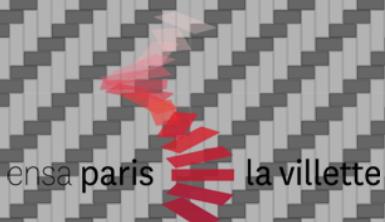


# La Fibre de carbone, le matériau de construction du futur ?



**ENSA Paris-La-Villette - 2022**

**Séminaire Activités et Instrumentation de la conception**

**M. François Guena - M. Joaquim Silvestre - Mme Anne Tüscher**



## Remerciements

Je souhaite remercier les enseignants qui ont encadré ce travail de mémoire, M. François Guena, M. Joaquim Silvestre et Mme Anne Tüscher. Leurs conseils, leur accompagnement et leur expérience ont été précieux.

Merci également à l'ensemble des personnes avec qui j'ai pu discuter de mon sujet et qui m'ont aidé dans la construction des réflexions présentées dans ce travail.



## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| REMERCIEMENTS.....   | 8  |
| INTRODUCTION.....  | 5  |
| I – LA FIBRE DE CARBONE.....   | 7  |
| I.1 – LE MATERIAU FIBRE DE CARBONE.....                                | 7  |
| I.1.1 - <i>Histoire de la fibre de carbone</i> .....                   | 7  |
| I.1.2 - <i>Production de la fibre de carbone</i> .....                 | 9  |
| I.1.3 - <i>Propriétés des fibres de carbone</i> .....                  | 11 |
| I.1.4 – <i>La fibre de carbone dans les matériaux composites</i> ..... | 13 |
| I.1.5 – <i>Mise en œuvre de matériau composite</i> .....               | 15 |
| I.2 – EXEMPLES DE MISE EN ŒUVRE DANS LE BATIMENT .....                 | 19 |
| I.2.1 – <i>Renforcement de structures</i> .....                        | 19 |
| I.2.2 – <i>Béton armé à la fibre de carbone</i> .....                  | 20 |
| I.2.3 – <i>Poutres treillis</i> .....                                  | 21 |
| I.2.4 – <i>Coques et autres types de mise en œuvre</i> .....           | 22 |
| II – LES PERSPECTIVES D'AVENIR.....                                    | 23 |
| II.1 – LE MARCHE DE LA FIBRE DE CARBONE .....                          | 23 |
| II.2 – LA LIGNINE COMME PRECURSEUR .....                               | 26 |
| II.3 – LES POSSIBILITES DE RECYCLAGE DE LA FIBRE DE CARBONE.....       | 30 |
| III – ETUDE DE CAS .....   | 33 |
| III.1 – PAVILLONS EXPERIMENTAUX.....                                   | 33 |
| III.2 – PANNEAUX DE FAÇADES DE GRANDE LONGUEUR.....                    | 37 |
| III.3 – STRUCTURES DE TOITURES LEGERES.....                            | 41 |
| III.4 – DES CABLES EN FIBRE DE CARBONE.....                            | 44 |
| CONCLUSION.....  | 47 |
| BIBLIOGRAPHIE.....   | 48 |



# Introduction

Dans l'histoire de l'architecture, l'utilisation des matériaux de construction a d'abord été liée à des savoir-faire et des ressources locales. Ces pratiques ont contribué à la constitution de patrimoines locaux qui donnent leur identité aux différentes régions du monde. Mais leur utilisation a bien évoluée tout au long de l'histoire de l'humanité, notamment grâce à la science et à la technique. La science, car elle a permis d'étudier le comportement des matériaux et d'identifier leurs caractéristiques. La technique car elle a permis de développer des méthodes constructives et d'assemblages toujours plus innovantes et performantes. Cela nous a permis de les associer et de les mettre en forme de manière de plus en plus complexe.

Avec l'industrialisation et la mondialisation, au XIXème siècle, l'emploi des matériaux s'est rationalisé. Avec l'utilisation du fer et du verre, des projets d'une nouvelle dimension et d'une nouvelle esthétique ont pu voir le jour, tels que le Crystal Palace ou la Tour Eiffel. Bien qu'ils n'aient pas forcément été extrêmement populaires en leur temps, ils se sont finalement révélés être des exemples notoires des possibilités qu'offrent l'utilisation de nouveaux matériaux ou de techniques innovantes. Le développement des transports à grande échelle, grâce à la découverte de nouvelles énergies, ainsi que l'industrialisation a modifié considérablement les relations entre les ressources locales et les matériaux de construction employés. Un changement de paradigme s'est ainsi opéré car les matériaux ne sont alors plus choisis pour leur disponibilité, mais avant tout pour leurs propriétés. La révolution constructive qu'a été la découverte du béton armé au XXème siècle a renforcé l'universalité de nos modes de construire. Ses caractéristiques intrinsèques permettent une mise en œuvre sur mesure, laissant ainsi la possibilité d'expressions formelles plus libres. L'innovation technologique permet de dépasser les limites des propriétés des matériaux et offrir toujours une plus grande liberté dans les choix architecturaux.

La combinaison de plusieurs matériaux peut leur conférer ensemble de meilleures performances de façon globale. Les matériaux composites, ne sont pas récents, en effet, la paille et la chaux (le torchis) ou le béton et l'acier (le béton armé) en sont deux exemples bien connus. On parle aujourd'hui le plus souvent des matériaux composites en désignant des matériaux industriels de hautes performances, assemblage de deux types de matériaux, des fibres, et des matrices, souvent plastiques. Ces matériaux très performants sont utilisés en grande quantité dans les industries de pointe tel que l'aéronautique, l'aérospatiale, les sports automobiles, etc. Leurs caractéristiques, notamment leur module de résistance, permet une véritable optimisation de la matière, alors même que la question des limites des ressources est de plus en plus d'actualité. Entre recherche de performances et réduction des impacts environnementaux, on assiste aujourd'hui à un intérêt grandissant pour les matériaux composites, notamment à base de fibre de carbone. Quel est donc le réel potentiel de la fibre de carbone dans la construction de bâtiments ?

Nous étudierons dans un premier temps les caractéristiques du matériau, la façon dont il est produit et de quelle manière il peut être mis en œuvre, notamment dans la formation de matériaux composites. Dans une deuxième partie, nous analyserons les perspectives du marché de ce matériau, ainsi que ses pistes d'améliorations futures. Enfin, nous verrons quelques exemples de bâtiments qui utilisent déjà la fibre de carbone, afin de mettre en évidence des perspectives d'avenir.



# I – La fibre de carbone

## I.1 – Le matériau fibre de carbone

### I.1.1 - Histoire de la fibre de carbone

L'invention de la fibre de carbone est attribuée à Joseph Swan, qui produira en 1860 les premières fibres de papier carbonisé. Elles servent de filaments à incandescence dans les lampes et sont faites à partir de fibre de coton. Thomas Edison reprendra la méthode et l'améliorera en utilisant le bambou carbonisé pour fabriquer ces fibres, qu'il brevete en 1879. Par la suite, un ingénieur de Thomas Edison, Lewis Howard Latimer, obtient de meilleurs résultats avec des filaments de carbone et l'invention est brevetée en 1881. Ces filaments ont été utilisés de nombreuses années avant d'être remplacés par les filaments en tungstène.

C'est au milieu du XXème siècle seulement que l'intérêt pour la fibre de carbone va renaître, grâce aux études de Roger Bacon sur le point triple du carbone. En 1958, il utilisera un procédé de carbonisation de la fibre de viscose, issue de la cellulose. Néanmoins leurs propriétés mécaniques restent limitées à cause de la teneur en carbone faible des fibres résultantes (20%).

Au même moment, dans les années 60, un nouveau procédé de production est développé par Akio Shindo à partir de polyacrylonitrile (fibres ex-Pan). Ces fibres, composées à 55% de carbone, permettent d'utiliser ces fibres en tant que renfort dans des matériaux composites. Les nombreuses recherches menées à l'époque pour trouver d'autres alternatives de précurseurs carbonés pour la production de fibres ont abouti au procédé de fabrication basé sur le brai de pétrole (fibres ex-Brai), permettant d'atteindre une composition en carbone à 85% dans les fibres produites.

Depuis les années 70, la fibre de carbone est un matériau de plus en plus étudié et dont l'utilisation est en cours de déploiement dans de nombreux domaines. Si la fibre de carbone reste utilisée dans sa grande majorité dans les industries de pointe, comme l'industrie spatiale, l'aéronautique ou les sports de haut niveau, l'intérêt pour ce matériau est grandissant dans de nombreux domaines. La part de la production dans l'industrie du bâtiment reste assez faible, mais est en plein essor, en particulier dans le renforcement de structures existantes (Fig. 2).

La production de la fibre de carbone a été démocratisée d'abord au Japon, où ont été créées les plus grandes entreprises industrielles de production de fibre de carbone. Environ la moitié de la production mondiale de la fibre de carbone est faite au Japon et aux Etats-Unis (Fig. 1). Nous verrons plus tard les évolutions et dynamiques du marché de la fibre de carbone.

| 2019           | en t/an        | en %          |
|----------------|----------------|---------------|
| États-Unis     | 45 300         | 30.0%         |
| Japon          | 27 100         | 18.0%         |
| Chine          | 17 300         | 11.5%         |
| Mexique        | 10 000         | 6.6%          |
| Taipei chinois | 8 800          | 5.8%          |
| Corée du Sud   | 8 600          | 5.7%          |
| France         | 7 400          | 4.9%          |
| Hongrie        | 6 200          | 4.1%          |
| Allemagne      | 5 800          | 3.8%          |
| Royaume Uni    | 5 000          | 3.3%          |
| Turquie        | 3 600          | 2.4%          |
| Inde           | 2 500          | 1.7%          |
| Autres pays    | 3 300          | 2.2%          |
| <b>TOTAL</b>   | <b>150 900</b> | <b>100.0%</b> |

Figure 1. - La production mondiale de fibre de carbone en 2019, répartie par pays. Reproduction à partir de [1].

| 2018                   | % masse | % valeur |
|------------------------|---------|----------|
| <b>Aéronautique</b>    | 36%     | 57%      |
| <b>Automobile</b>      | 24%     | 18%      |
| <b>Éolien</b>          | 13 %    | 8%       |
| <b>Sport et loisir</b> | 13%     | 11%      |
| <b>Construction</b>    | 5 %     | 2%       |
| <b>Autres</b>          | 9%      | 5%       |

Figure 2. – La production mondiale de fibre de carbone répartie par marchés industriels en 2018. Reproduction à partir de [1].

Aujourd’hui, 96% des fibres de carbone produites dans le monde sont des fibres ex-PAN, et sont donc faites à partir de polyacrylonitrile. Les 4% restants sont des fibres ex-BRAI ou provenant des autres précurseurs minoritaires. Nous allons voir quelles sont les différences entre les fibres ex-BRAI et ex-PAN et les différents précurseurs. [1]

### I.1.2 - Production de la fibre de carbone

Aujourd’hui, on connaît de nombreux précurseurs possibles pour produire la fibre de carbone : d’après Huang Xaosong [2], le polyacrylonitrile (PAN) et le brai ou mesophase pitch (MP) sont les principaux précurseurs utilisés, il évoque aussi la cellulose, la lignine ou encore la réutilisation de plastique recyclé. Les procédés d’élaboration, techniquement différents, suivent les mêmes étapes :

- Traitement de stabilisation afin d’éviter la fusion ;
- Carbonisation servant à éliminer du précurseur les atomes autres que le carbone ;
- Traitement à haute température permettant d’améliorer les propriétés mécaniques de la fibre en fonction des objectifs visés

#### Ex-PAN

Les fibres de polyacrylonitrile (PAN) sont issues de l’industrie chimique. Ce procédé est souvent préféré car ce précurseur présente un meilleur rendement et permet une meilleure mise en œuvre de la structure moléculaire des fibres. La phase de stabilisation s’effectue entre 200°C et 300°C et la phase de carbonisation entre 1000 et 1700°C et une phase de traitement haute température ( $T>2500^{\circ}\text{C}$ ) selon les caractéristiques recherchées. De bout en bout de ce cycle de traitement thermique, les fibres de PAN vont passer d’une teneur en carbone d’environ 60% à une teneur de plus de 90% dans la fibre de carbone finale. Plus le traitement thermique est long, plus la teneur en carbone de la fibre est élevée. On choisit précisément les processus en fonction des propriétés mécaniques que l’on veut obtenir de la fibre produite. [3]

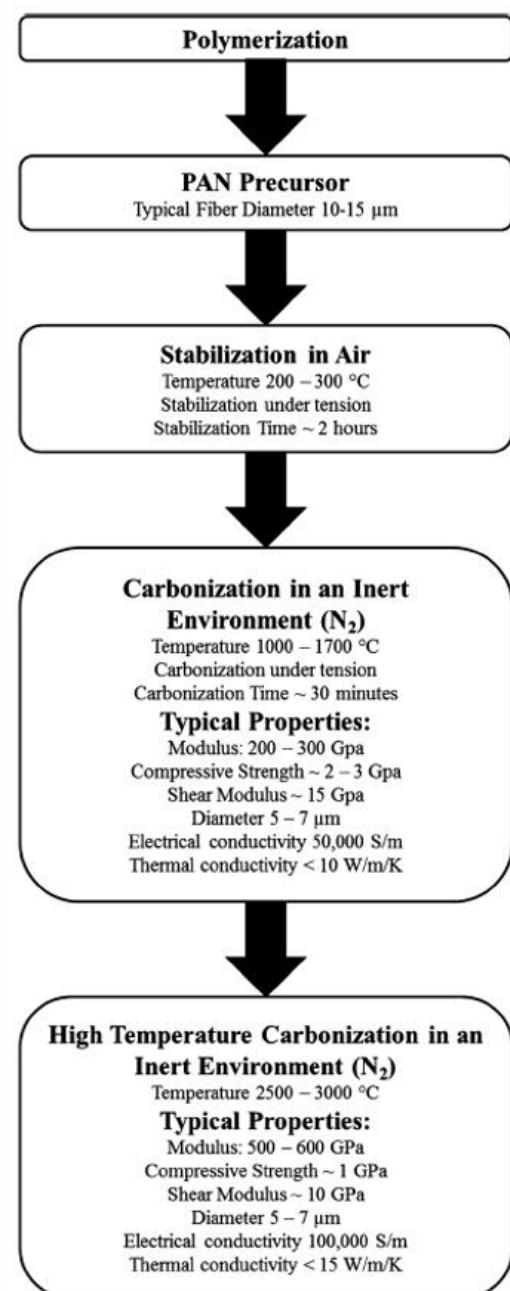


Figure 3. – Les différentes étapes de la production d’une fibre de carbone issue du PAN. Reproduction à partir de [3].

## Ex-Brai

Le Brai est un matériau viscoélastique extrait du pétrole par distillation ou extrait de certaines parties de stock de charbon. Ce précurseur est disponible en grande quantité et est assez peu coûteux. Malgré tout, son utilisation dans la production de fibres de carbone est très restreinte aujourd’hui, avec moins de 4% de la production mondiale. [1] Sa stabilisation s’effectue entre 350 et 400°C, après laquelle une phase de purification est nécessaire, réduisant son avantage économique initial. La carbonisation est faite aux alentours de 2000°C et la pseudo-graphitisation par traitement haute-température jusqu’à 3000°C. Ce type de fibre est isotrope. Néanmoins, aux fortes températures nécessaires à sa transformation, comparé au PAN, le Brai reste un précurseur moins avantageux pour la production de fibres de carbone. [3]

## Ex-Cellulose

La cellulose naturelle, discontinue et présentant des impuretés (aussi appelée lignine) conduit à des fibres de carbone discontinues et à des propriétés mécaniques faibles. On utilise donc souvent des fibres de cellulose artificielles continues, extraite de matériaux naturels discontinus (rayonne), qui permettent d’obtenir des fibres de qualité supérieure. Les premières fibres de carbones introduites sur le marché, dans les années 60 étaient produites à partir de rayonne. Même si leur production n’est aujourd’hui que très restreinte, avec moins de 2% de la production mondiale en 2016, les fibres ex-cellulose suscitent un intérêt particulier. En effet, ce précurseur biosourcé et disponible en grande quantité en particulier comme matière non valorisée dans les chaînes de production ou même les fin de vie et de cycle lui donne un grand potentiel dans la perspective de produire des fibres de carbone à bas coût et avec un impact environnemental plus faible. Ces fibres de carbone utilisent la pyrolyse ( $T < 400^\circ\text{C}$ ) et la carbonisation ( $T < 1500^\circ\text{C}$ ) suivie d’un traitement haute température ( $T > 2500^\circ\text{C}$ ). [4]

Nous avons vu ici les principaux précurseurs de la fibre de carbone proposée sur le marché mondiale. Il faut tout de même noter que la recherche s’intéresse de plus en plus à une grande diversité des précurseurs, notamment différents types de précurseurs biosourcés ou issus du recyclage de matériaux plastiques ou carbonés. En effet, les intérêts sont grandissants pour une diversification des précurseurs, dans des objectifs de faire grandir le marché, soumis à une demande forte et grandissante aussi bien que dans le but plus noble de réduire l’impact environnemental de la fibre de carbone et de rendre ce matériau indépendant de la nécessité de l’extraction des hydrocarbures. Un autre objectif est de diversifier les types de fibres de carbone, avec des propriétés différentes, permettant des usages plus vastes encore.

### I.1.3 - Propriétés des fibres de carbone

La fibre de carbone fabriquée à partir des procédés présentés précédemment mène à toute une gamme de fibres aux propriétés différentes, notamment fonction de la dernière étape de la fabrication par traitement haute température. Les fibres sont classées en fonction de leur module d'élasticité et de leur résistance. Une classification des fibres de carbone a été mise en place par le comité international sur la nomenclature (IUPAC), en 1987. (Fig. 4)

| Type de fibre de carbone | Description                   | Caractéristiques  |
|--------------------------|-------------------------------|---|
| UHM                      | Fibres ultra haut module      | $E > 600 \text{ GPa}$   |
| HM                       | Fibres haut module            | $E > 300 \text{ GPa} ; \sigma / E < 0,01$                               |
| IM                       | Fibres à module intermédiaire | $E < 300 \text{ GPa} ; \sigma / E > 0,01$                               |
| LM                       | Fibre bas module              | $E < 100 \text{ GPa} ; \sigma \text{ faible}$                           |
| HT                       | Fibre haute résistance        | $E \text{ entre } 150 \text{ et } 300 \text{ GPa} ; \sigma / E > 0,015$ |

Ou  $E$  est le module d'Young (GPa) et  $\sigma$  la résistance à la traction (GPa)

Figure 4. – Les différents types de fibres de carbone selon l'IUPAC. [5]

Pour ce qui est des propriétés des fibres en fonction de leur précurseurs, de nombreuses études ont pour objectifs d'essayer de les identifier et de les comparer. Chaque précurseur a ses particularités chimiques et structurelles et va donc mener à des fibres caractérisées dans un champ de propriétés qui lui est propre, comme on peut le voir sur la Fig. 5. D'après les définitions de l'IUPAC, le précurseur qui permet le plus facilement d'arriver à une fibre de carbone de classification UHM est le brai (mesophase pitch). [5]

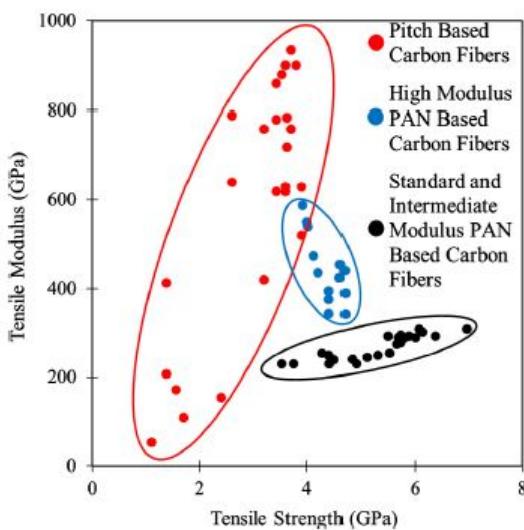


Figure 5. – Classification des fibres selon leurs propriétés et leur précurseur.

Reproduction à partir de [3] (Les légendes tensile strength et modulus sont ici inversées)

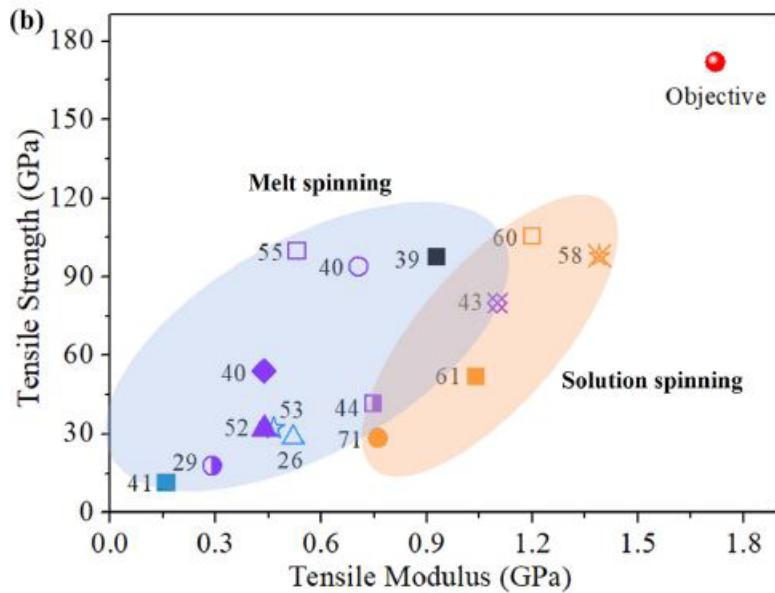


Figure 6. – Classification des fibres de carbones à base de lignine selon leurs propriétés.

Reproduction à partir de [6]

Les fibres de carbone obtenues par les précurseurs à base de Lignine sont encore aujourd’hui caractérisées par des résistance à la traction et des modules de traction plus faibles que les fibres de carbone ex-Brai et ex-PAN. Comme on peut le voir sur la figure 6, la résistance à la traction de ces fibres est entre 20 et 120 GPa, et le module de traction est de 0,15 à 1,5 GPa. Les fibres ex-Lignine sont donc classifiées comme des fibres à bas module (LM).

Les tableaux précédents donne les propriétés générales des fibres de carbone elles-mêmes, dans leur sens longitudinal, mais on désigne souvent à tors la fibre de carbone en parlant en fait de matériaux composites, qui sont composés de fibres de carbones et d'une matrice, celle-ci est de nature polymérique dans le cas du composite le plus courant : le polymère renforcé en fibre de carbone (PRFC).

#### I.1.4 – La fibre de carbone dans les matériaux composites

La fibre de carbone n'est jamais utilisée dans l'industrie en tant que matériau seul. Elle rentre dans la composition de matériau composite. La fibre de carbone agit comme structure stabilisatrice dans une matrice, jouant le rôle de l'élément résistant en traction, comme l'acier dans le béton armé. Les composites à base de fibre de carbone font partie de la famille des polymères renforcés. Il en existe différents types, composés de différentes matrices et de différents matériau de renfort. Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement aux polymères renforcés en fibre de carbone (PRFC). Il existe également d'autres matériaux composites à base de fibre de carbone, comme avec des matrices en béton, à base de métaux, mais ces composites sont beaucoup moins courants.

En tant que matériaux composites, les PRFC sont assez difficiles à décrire de façon générale avec des propriétés précises. En effet, leurs propriétés dépendent d'un grand nombre de critères, à savoir le nombre de couches de fibres, leur angle d'arrangement, le pourcentage de résine dans l'ensemble, le type de résine utilisée. Dans les PRFC, de nombreuses matrices peuvent être utilisées, on peut les classer en deux grandes catégories :

- Les résines thermodurcissables
- Les résines thermoplastiques

Dans la famille des résines thermodurcissables, on peut trouver les résines Epoxy, les résines Phénoliques, les résines Polyester, les résines Poly imides ou encore les résines Vinyle. Cette famille, comme son nom l'indique, consiste en des matériaux, liquides à l'origine, qui, sous l'effet de l'augmentation de la température et de la pression, voire de la lumière, vont changer d'état et se durcir. Leur état final est figé et une nouvelle montée en température ne fera pas fondre le matériau ainsi durci. Ces matrices sont donc idéales dans une utilisation qui doit résister à la chaleur et à des conditions extrêmes, comme dans l'aéronautique par exemple. Les propriétés de cette famille de résines thermodurcissables sont données dans la Figure 7. [7]

| Resins       | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Tensile modulus (GPa) | Tensile strength (MPa) |
|--------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Epoxy        | 1.2–1.4                      | 2.5–5.0               | 50–110                 |
| Phenolics    | 1.2–1.4                      | 2.7–4.1               | 35–60                  |
| Polyesters   | 1.1–1.4                      | 1.6–4.1               | 35–90                  |
| Vinyl esters | 1.04–1.1                     | 3.2–3.6               | 68–80                  |

Figure 7. – Propriétés typiques des résines thermodurcissables.

Reproduction à partir de [7]

Dans la famille des résines thermoplastiques, on trouve les résines Acrylonitriles, les résines Polyamides, ainsi que les résines Polycarbonate, Polyéthylène ou Polyéther. Cette autre famille, réagit aussi à la température et à la pression mais va avoir un caractère inverse en étant solide en conditions atmosphériques et en devenant ductile voire liquide avec une température plus élevée. Ces matériaux thermoplastiques ont l'avantage de pouvoir subir plusieurs cycles de transformations sans que leur structure chimique soit impactée. Il est donc plus facile de les réutiliser en fin de vie. Les propriétés de cette famille de résines thermodurcissables sont données dans la Figure 8.[7]

| Resins                   | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Tensile modulus (GPa) | Tensile strength (MPa) |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Polypropylene            | 0.90                         | 1–1.4                 | 25–38                  |
| Polyethylene             | 0.9–1.0                      | 0.7–1.4               | 20–35                  |
| Polycarbonate            | 1.06–1.2                     | 2.2–2.4               | 45–70                  |
| Nylon                    | 1.1                          | 1.3–3.5               | 55–90                  |
| Polyester                | 1.3–1.4                      | 2.1–2.8               | 55–60                  |
| Poly(ether ether ketone) | 1.3–1.35                     | 3.5–4.4               | 100                    |
| Poly(phenylene sulfide)  | 1.3–1.4                      | 3.4                   | 80                     |
| Polyetherimide           | 1.27                         | 3                     | 105                    |

Figure 8. – Propriétés typiques des résines thermoplastiques.

Reproduction à partir de [7]

Sur le marché grandissant des PRFC, la préférence est donc du côté des résines thermodurcissables. [8] Les plus utilisées sont les résines Polyester, Vinyle et Epoxy. En particulier, la résine Epoxy, reste la plus utilisée, notamment quand il s'agit de rechercher les meilleures caractéristiques techniques possibles, comme dans l'aéronautique, même si son coût est un peu plus élevé. [7] Que les résines utilisées soient thermodurcissables ou bien thermoplastiques, les méthodes de mise en œuvre des matériaux composites PRFC sont très diverses.

### I.1.5 – Mise en œuvre de matériau composite

Comme nous l'avons vu, la mise en œuvre de la fibre de carbone se fait dans la grande majorité des cas en tant qu'élément structurel de renfort dans un matériau composite. Nous allons voir ici les différentes possibilités de mise en œuvre de PRFC qui existent aujourd'hui :

#### - Moulage au contact

Le moulage au contact consiste à confectionner un moule ouvert dans lequel on va déposer des couches de tissu de fibre de carbone prêt à l'emploi. Ensuite, la résine est appliquée sur toute la surface du moule de façon à ce qu'elle imprègne complètement le tissu et qu'elle le recouvre entièrement en prenant la forme du moule. Le moule est ensuite mis à sécher pour faire durcir le polymère à une température de 120°F (soit environ 50°C) dans un four, afin d'accélérer le processus. Cette méthode de mise en œuvre est l'une des moins coûteuse et la plus répandue sur le marché des éléments en PRFC. [7]

Cette méthode demande de la main d'œuvre, mais assez peu d'énergie et de moyens techniques sophistiqués, cependant, elle ne permet pas un processus automatisé qui permettrait de faire des économies d'échelle et de le rendre viable sur des grandes chaînes industrielles, comme dans l'automobile. Néanmoins, de nombreuses expérimentations sur la mise en œuvre de PRFC sont en cours afin d'envisager la facilitation de son industrialisation.

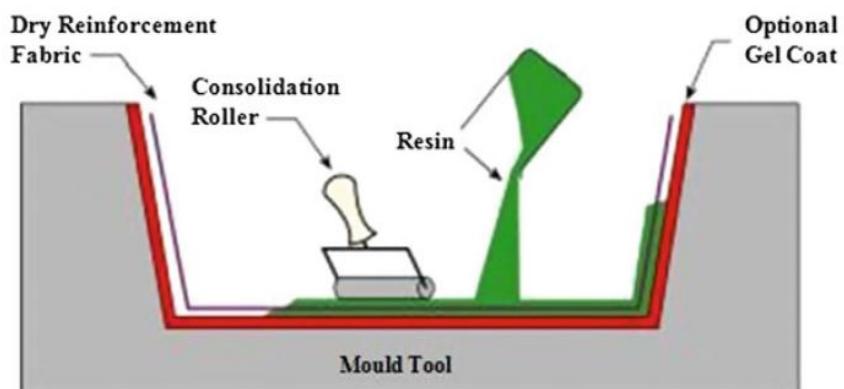


Figure 9. – Mise en œuvre de PRFC par moulage au contact.

Reproduction à partir de [7]

### - Moulage par projection

Le moulage par projection consiste à projeter de la résine sur un moule. La projection se fait avec un tissu de fibre de carbone déjà mis en place dans le moule, ou bien elle peut aussi se faire avec la projection simultanées par le pistolet de fibres de carbone se déroulant d'une bobine et de résine. Le processus est ensuite identique que pour la méthode précédente pour le séchage du matériau. L'avantage principal de cette méthode est sa facilité et sa rapidité de mise en œuvre. Elle permet également une imprégnation des fibres de carbone plus fiable, mais cela résulte en un matériau dont on ne contrôle pas l'uniformité aussi bien. Cette méthode est utilisée quand le contrôle des propriétés n'est pas la principale caractéristique recherchée, comme dans les coques de petits bateaux ou de caravanes. [7]

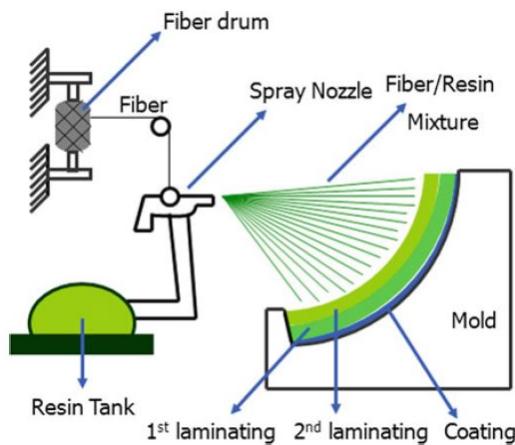


Figure 10. – Mise en œuvre de PRFC par moulage par projection.

Reproduction à partir de [7]

### - Moulage par transfert ou RTM (Resin Transfer Moulding)

Le moulage par transfert est une méthode industrielle très utile car elle permet un processus de mise en œuvre rapide et répétitif. Un moule est nécessairement constitué en deux parties, l'une sur laquelle les différentes couches de tissus de fibre de carbone seront déposées et l'autre qui permettra ensuite de refermer et de constituer la forme finale de la pièce. Ensuite, la résine liquide est injectée sous pression dans le moule afin de combler tous les vides et d'épouser parfaitement sa forme. La pièce est ensuite démoulée et peut-être déplacée pour être curée dans un four. [7]

Cette mise en œuvre est aujourd'hui bien maîtrisée et permet de fabriquer des pièces d'assez large taille ou bien des pièces à géométrie complexe. De nombreux autres avantages sont issus de cette méthode de mise en œuvre, comme par exemple le fait d'éviter l'émissions de particules volatiles dans l'air, la possibilité de créer des pièces d'une épaisseur très réduite, la fiabilité des pièces qui est plus grande ou bien encore la possibilité de l'automatisation de la mise en œuvre. [7]

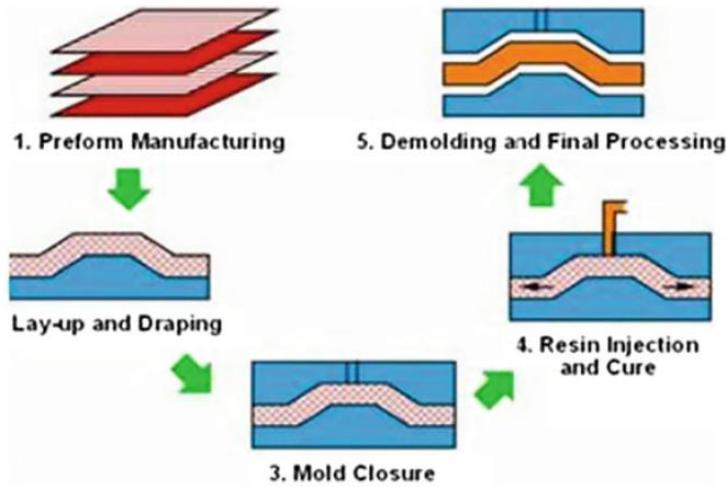


Figure 11. – Mise en œuvre de PRFC par moulage par transfert.

Reproduction à partir de [7]

#### - Moulage sous vide ou infusion

Le moulage sous vide est une version avancée du moulage au contact. Il nécessite un seul moule et toutes les étapes sont identiques. La seule différence est qu'une fois les fibres de carbone déposées dans le moule, la pièce sera enfermée dans une sorte de grande bulle sous forme d'un sac plastique. Ce dernier est ensuite mis sous vide et la résine est infiltrée sous pression grâce à la dépression créée par le vide. Cette mise en œuvre permet une meilleure imprégnation de la pièce et de la fibre de carbone et résulte donc dans des pièces plus homogènes et de meilleure qualité. [7]



Figure 13. – Photo de l'infusion d'une coque d'un bateau de plus de 50m en PRFC.

Reproduction à partir de [9]

### - Enroulement par drapage

Les PFRC peuvent aussi être déroulés par filaments préimprégnés de résine et déposés sur un moule en rotation (un mandrin). Cette méthode est utilisée afin d'obtenir des formes tubulaires à section circulaire, ou bien même des formes sphériques résistant à de très hautes pression, pour en faire des réservoirs de fluides pour les fusées par exemple. [7]

Cette méthode de pointe n'est pas très démocratisée sur le marché. Elle nécessite des robots automatisés et constituent un investissement très couteux. En effet, son utilisation doit être maîtrisée parfaitement, en étudiant bien la quantité de résine, la tension à donner aux fibres de carbone, la vitesse de mise en place, etc. Tous ses paramètres influencent les caractéristiques finales des éléments constitués. (Fig. 14)

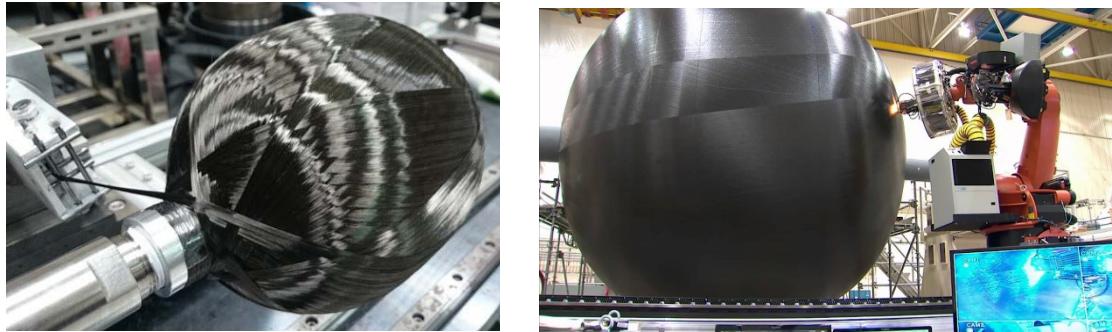


Figure 14. – Photos de mise en œuvre par enroulement filamentaire.

Sources : à gauche [10] et à droite [11].

Nous avons décrit ici les grands types de mise en œuvre possibles de la fibre de carbone sous forme de PRFC, mais il en existe une multitude, pour donner quelques autres exemples : le moulage sous pression, le moulage par injection, le thermoformage ou encore la pultrusion. De nombreux laboratoires de recherches s'intéressent à la fibre de carbone et sa mise en œuvre est testée sous de nombreuses formes, en testant différents types de fibres, différents types de résines, afin d'améliorer les connaissances de ces matériaux. Ces avancées permettent d'aller vers des possibilités de mise en œuvre, notamment industrielle, qui permettrait de réduire les coûts et de rendre les matériaux composites à base de fibre de carbone de plus en plus compétitifs.

## I.2 – Exemples de mise en œuvre dans le bâtiment

Dans le milieu du bâtiment, il est bien connu que les changements de méthodes constructives se font de manière très lente par rapport aux autres industries, car c'est une industrie qui a une très forte inertie. Avant que le béton armé devienne, au cours des 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècle, un des matériaux les plus incontournables de la construction. La forme que prennent ces nouveaux matériaux, quand ils arrivent sur le marché, est souvent contrainte par la pensée de la forme induite par les matériaux déjà utilisés, correspondant pourtant à leurs caractéristiques propres et intrinsèques ainsi qu'aux limites des possibilités de leur mise en œuvre. Qu'en est-il alors de l'utilisation des matériaux composites à base de fibre de carbone aujourd'hui ? Quelle est son utilisation dans le bâtiment, pour quels usages et quelles formes en émanent ?

### I.2.1 – Renforcement de structures

Dans le marché du bâtiment et du génie civil, on construit aujourd'hui très peu, comparé à la masse des infrastructures et des bâtiments préexistants. Ainsi, un des enjeux du 21<sup>ème</sup> siècle est de réparer et de faire perdurer ce patrimoine, afin que sa valeur d'usage puisse être prolongée. Cette recherche pour aller vers la réparation fait appel à des principes de sécurité, bien évidemment, mais aussi de plus en plus à la prise en compte des facteurs environnementaux dans la gestion des projets. Il est donc de moins en moins envisagé de démolir pour reconstruire quand on peut se donner les moyens de réparer. Les PRFC, dans ce contexte, même s'ils restent trop chers pour être des matériaux compétitifs dans des structures primaires de bâtiments neufs, trouvent un usage dans les réparation ou les réhabilitation. Cela se fait notamment dans le cadre de renforcement de structure en béton armé, pour les renforcer grâce à des bandes appelées plat carbone qui sont accolées sous des poutres. Celles-ci permettent de reprendre une partie des charges [12]



Figure 9. – Photos de mise en œuvre de plats carbone en renforcement de poutres.

Sources : à gauche [12] et à droite [13].

Comme illustré sur la figure 10, les plats carbones agissent comme des renforts qui reprennent les efforts de traction dans la partie basse des poutres renforcées. Cet effet est équivalent à ce que l'on obtiendrait avec des aciers supplémentaires dans les poutres. On ne peut bien évidemment pas ajouter des aciers dans les poutres une fois que celles-ci sont coulées et en places. Les plats carbones peuvent donc être de très bons moyens pour renforcer des structures en béton armé qui sont affaiblies par leur fatigue accumulée au cours de leur vie, ou bien tout simplement lorsque l'on veut augmenter les caractéristiques de résistances des structures lors de travaux de réhabilitation.

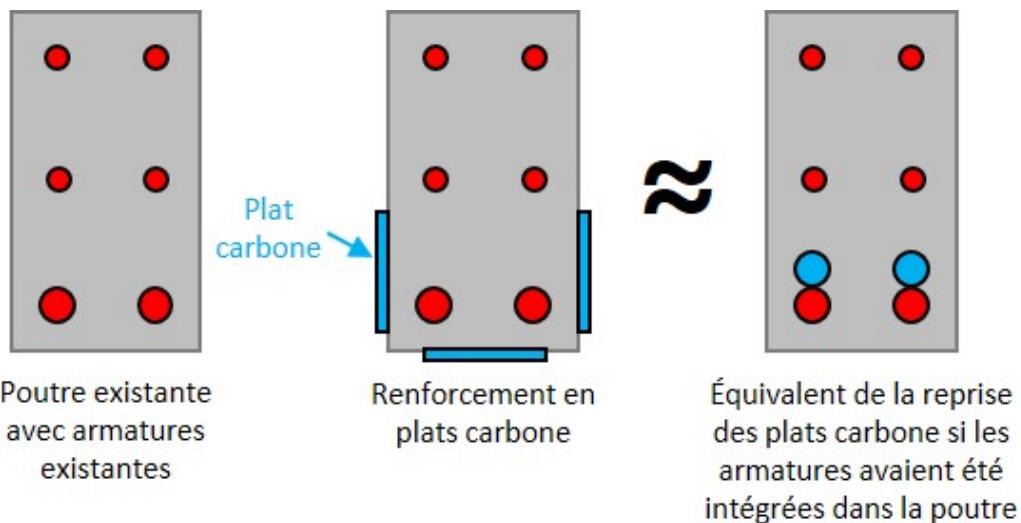


Figure 10. – Schéma de fonctionnement d'un plat carbone.

Reproduction à partir de [12]

### I.2.2 – Béton armé à la fibre de carbone

Dans un esprit de continuité avec l'industrie actuelle du bâtiment, prenant en compte l'innovation des nouveaux matériaux, des entreprises comme AltusGroup, se prennent à imaginer que la fibre de carbone pourrait remplacer les aciers dans le béton armé. Selon eux, la fibre de carbone aurait de nombreux avantages comparé à l'acier. D'abord, la fibre de carbone ne risquant pas de rouiller, il n'y aurait pas besoin qu'elle soit enrobé et protégée autant que les aciers avec une épaisseur supplémentaire de béton, non structurelle. L'utilisation de la matière première serait donc réduite de façon assez importante. Le poids des structures serait donc également réduit de manière drastique, par l'abaissement du poids propre de l'ensemble de la structure et par l'utilisation de fibres de carbones, plus résistantes que l'acier en traction.

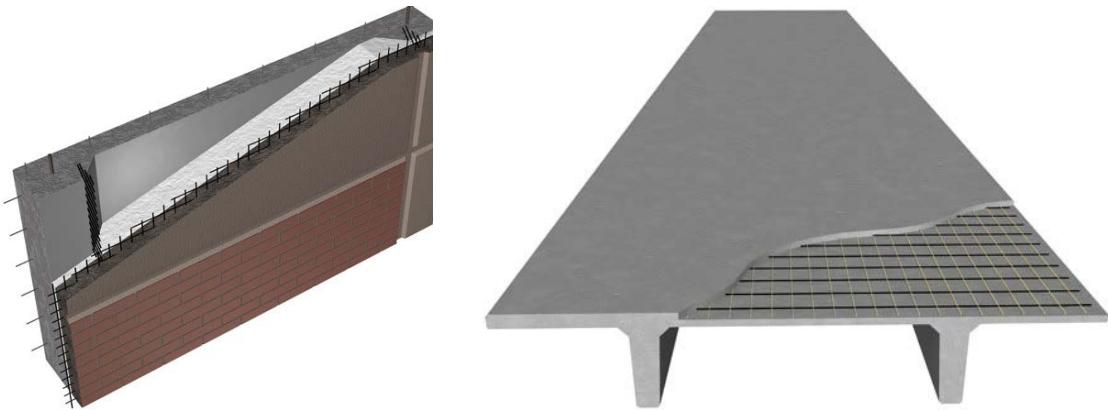


Figure 11. – Images de synthèse d'un prémur et d'une dalle préfabriquée en béton armé à base de grilles de fibres de carbones entrelacées.

Reproduction à partir de [13]

### I.2.3 – Poutres treillis

Dans un même esprit mimétique des mises en œuvres courantes, cette fois-ci en prenant exemple sur l'acier, des entreprises donne au PRFC la forme de profilés communs dans l'utilisation, en sections carrées, rectangulaires ou tubulaires, en plats, en L ou en T. Ces mêmes éléments sont ensuite utilisés dans une mise en œuvre classique de poutres treillis. C'est le cœur de métier de l'entreprise Element 6 composites. Ces structures, si elles restent intéressantes en tant qu'expérimentations, trouvent un marché de niche sur des applications bien particulière où les moyens financiers ne sont pas nécessairement limités. Mais leur prix ne permet pas d'imaginer que ces éléments puissent être constitutifs de systèmes structurels primaires pour des bâtiments neufs construits aujourd'hui, quels qu'ils soient.



Figure 12. – Photo d'un test de résistance d'une poutre treillis composée d'éléments de PRFC.

Reproduction à partir de [14]

#### I.2.4 – Coques et autres types de mise en œuvre

Malgré tout, les PRFC sont des matériaux bien distincts des matériaux que l'on connaît déjà, que ce soit le béton armés, les aciers, le bois, les plastiques, ils ont des caractéristiques bien distinctes qui permettent une diversité de mise en œuvre bien plus grande que celle que l'on a vu dans les exemples précédents.

Les PRFC permettent par exemple de fabriques des coques de grandes dimensions en une seule et même pièce, comme c'est le cas dans la fabrication des bateaux. On peut en voir une illustration dans la figure 13.

Ce pont construit en Norvège fait partie d'une série de petits ponts qui sont en cours de construction dans le cadre d'un programme de recherche de l'Union Européenne, menée par SINTEF. Nommé DACOMAT, ce projet de recherche a pour objectif de viser au développement de matériaux composites plus fiables et plus durables. Elle entend promouvoir l'utilisation des matériaux composites et notamment leur viabilité financière ainsi que leur avantage concurrentiel sur le cycle de vie des ouvrages d'arts produits, en espérant participer ainsi à une industrie plus vertueuse.



Figure 13. – Photo d'un pont test de résistance d'une poutre treillis composée d'éléments de PRFC.

Reproduction à partir de [15]

## II – Les perspectives d'avenir

Après avoir étudié la fibre de carbone, ses caractéristiques, ses méthodes de mise en œuvre possibles ainsi quelques exemples d'utilisation dans le bâtiment, nous allons étudier plus particulièrement le potentiel de ce matériau ainsi que ses limites, afin d'essayer de comprendre quel place il pourrait avoir en tant que matériau usuel dans le bâtiment dans le monde de demain.

### II.1 – Le marché de la fibre de carbone

Depuis les années 1990, le marché de la fibre de carbone est en pleine expansion. Et pour preuve : chaque fois que des chercheurs ou des scientifiques ont tenté de dresser des courbes de tendance prévoyant la hausse du marché, cette hausse a toujours été excédée.

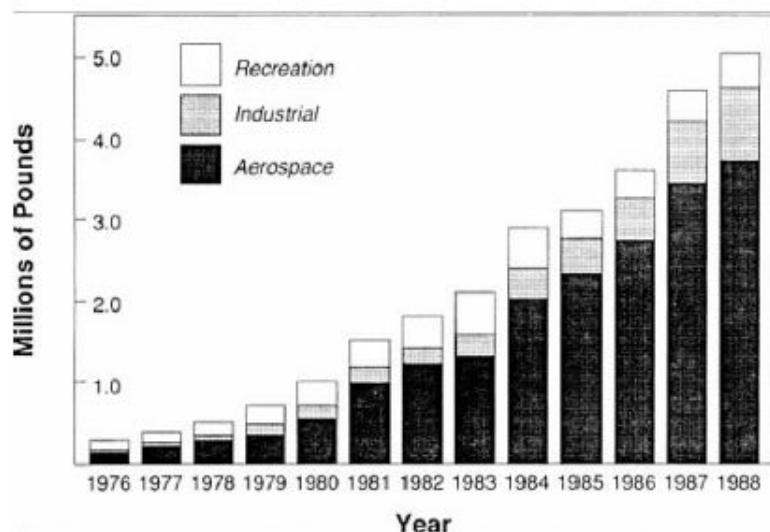


Figure 14. – Graphique représentant la production annuelle de fibre de carbone de 1976 à 1988.

Reproduction à partir de [16]

L'augmentation des années 1980-90 s'expliquent en grande partie par une utilisation croissante dans l'industrie aérospatiale. Celle-ci prend en effet une place prépondérante et grandissante dans la part de la fibre de carbone produite chaque année. Cette répartition n'est plus d'actualité et l'industrie aérospatiale, même si elle reste en demande croissante depuis, ne représente plus une majorité de la demande en fibre de carbone.

En effet, dans les années 2015-2020, cette répartition est beaucoup plus complexe de par la démocratisation des matériaux composites en fibre de carbone dans bon nombre d'industries. Entre 2019 et 2020, comme on peut le voir sur la figure 15, la demande pour la construction automobile (courbe rouge) a d'ailleurs dépassé pour la première fois la demande de l'industrie aérospatiale (courbe bleu foncé).

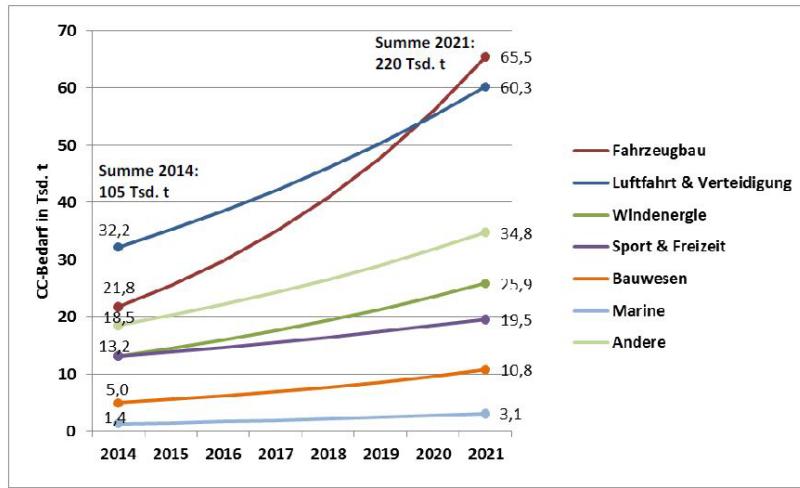


Figure 15. – Demande de fibre de carbone selon les différents secteurs industriels.

Reproduction à partir de [17]



Figure 16. – Evolution du marché de la fibre de carbone et croissance par grands secteurs.

Reproduction à partir de [7]

On constate sur la Figure 16 que bien que le marché de la fibre de carbone soit en progression constante sur les 40 dernières années, celui-ci a connu un coup dur dans les années 2008-2009 avec une stagnation. Celle-ci est très probablement due à la crise financière et notamment à la dépendance actuelle du prix de la fibre de carbone au prix des hydrocarbures.

Cela nous permet d'émettre la conjoncture et l'hypothèse que la démocratisation de la fibre de carbone et des composites est directement liée à son coût. Ainsi, plus ce dernier baisse et plus le matériau devient compétitif par rapport aux matériaux usuels de la construction du bâtiment. Il pourrait alors probablement devenir, à l'avenir, une ressource viable économiquement pour des types de structures de plus en plus divers.

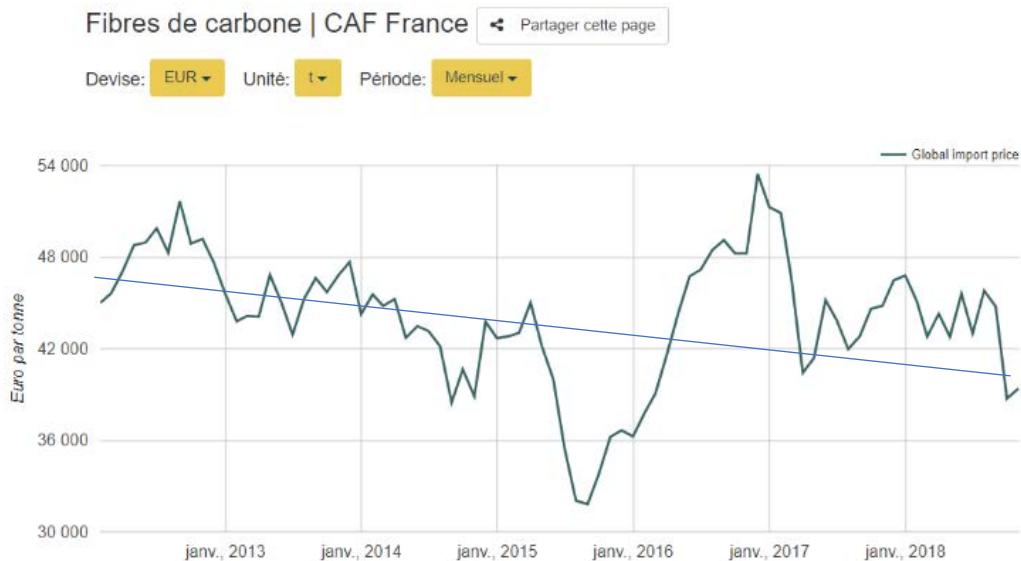


Figure 17. – Evolution du prix de la fibre de carbone de 2012 à 2018.

Reproduction à partir de [18]

On constate néanmoins une évolution du prix du matériau globalement à la baisse, avec une économie de 11% entre 2012 et 2018. La fibre de carbone est en plein développement et nous pouvons imaginer que son prix va progressivement baisser au fur et à mesure de l'augmentation de sa production annuelle.

Bien que la tendance globale soit à la baisse, on peut tout de même voir que le prix subit des fluctuations intempestives à la hausse et à la baisse. Une étude de 2016 sur le coût de la fibre de carbone conclue que le matériau est très sensible au prix de l'énergie. [19] Il est ainsi mis en valeur que la fabrication de fibre de carbone doit à la fois chercher à s'implanter dans des endroits où les coûts de l'énergie sont les plus stables et les plus bas, ainsi que la nécessité d'aller dans le futur vers des processus de fabrication plus optimisés pour réduire la consommation d'énergie.

## II.2 – La lignine comme précurseur

Comme nous l'avons déjà présenté, la lignine est un précurseur possible pour la production de fibre de carbone depuis bien longtemps. Les premières fibres de carbone produites étaient bel et bien biosourcées, avant que l'industrie pétrochimique prenne le relais et démontre la faisabilité et surtout l'avantage concurrentiel des fibres ex-Brai et ex-PAN sur les fibres bis-sourcées. En effet, entre les années 70 et 2000, les coûts des matières premières et notamment des hydrocarbures ne sont pas des facteurs limitants.

Aujourd'hui, alors que nous recherchons de plus en plus à baisser les coûts, à optimiser la production et surtout aussi à être moins dépendants des énergies fossiles, beaucoup de recherches se tournent vers les matériaux biosourcés, le biomimétisme et toutes les stratégies permettant de réduire les dépenses énergétiques des processus industriels. Dans l'industrie de la production de la fibre de carbone et des composites, cela se retrouve par la recherche de nouveau procédés permettant de rendre à nouveau possible l'utilisation de précurseurs non conventionnels dans l'objectif de les rendre concurrentiels sur le marché ou pour ouvrir d'autres pistes industrielles.

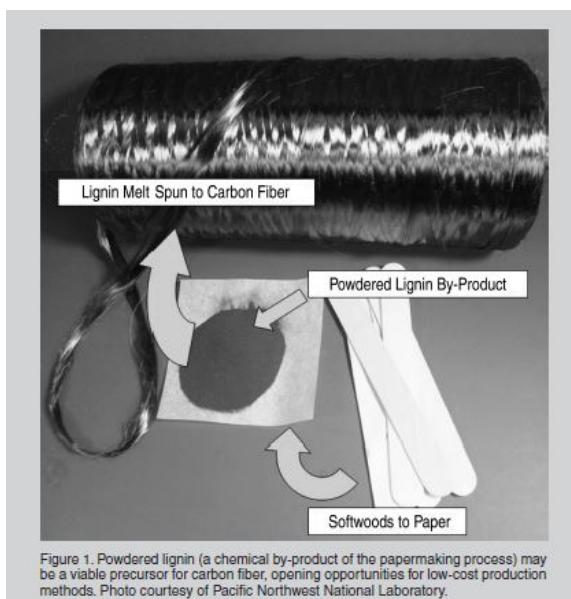


Figure 18. – Fibre de carbone issue de lignine, sous-produit de la production de papier.

Reproduction à partir de [20]

Rogelio A. Sullivan, dans une revue de l'état du marché en 2006, fait état de la bonne santé du marché de la fibre de carbone. Il décrit un avenir prometteur, qui se repose bien entendu d'abord sur une croissance forte de la demande et de la production dans toutes les industries, mais se réjouit des avancées techniques en cours de développement, notamment au regard du recyclage des composites en fibre de carbone mais aussi de l'éventualité de la production de fibre de carbone à base de lignine. Selon lui, si cette dernière s'avère techniquement et économiquement faisable, la perspective d'un renouvellement total du marché s'opérerait, avec la possibilité pour de

nombreuses nouvelles industries de s'intéresser au matériau. Il serait alors possible, si l'on en croit son analyse, que l'automobile ou le bâtiment se mettent à utiliser bien plus massivement les PRFC, ce qui pourrait, en augmentant à nouveau la demande, stabiliser le marché à un niveau de production favorisant une utilisation de plus en plus importante. Cette utilisation permettant une réduction drastique, dans le cas précis analysé du poids des véhicules produits, ainsi que de leur consommation d'énergie. [20]

La lignine est d'après A. Milbrandt et S. Booth le deuxième plus abondant polymère qui donne leurs structure de support aux plantes et aux algues, derrière la cellulose. C'est aussi un produit dérivé de l'industrie du papier ou du bioéthanol. Etant donné que ce dérivé n'est aujourd'hui que très peu valorisé, ou alors seulement brûlé comme biomasse, la lignine apparaît donc comme un précurseur très prometteur pour la production de fibres de carbone. [4]

Si l'on en croit les conclusions d'un article de 2014 traitant de la possible utilisation de la lignine en tant que précurseur pour produire des fibres de carbone, la valeur ajoutée pourrait être considérable quand on sait que la lignine en tant que biomasse est valorisée à environ 30 \$ / Tonne alors que le prix de la fibre de carbone se situe plutôt autour de 15 à 20 €/ Kg. L'augmentation de la demande en fibre de carbone sur le marché ne serait selon eux pas capable de rivaliser avec la taille grandissante de l'industrie des bioraffineries. [21]

Ainsi nous avons la preuve de la possibilité de produire une quantité significative de fibre de carbone de façon biosourcée, et ce, sans avoir à extraire de nouvelles matières premières organiques de l'environnement, mais seulement en utilisant les "déchets" d'autres industries préexistantes. La figure 19 montre la part de la biomasse sous forme de lignine qui peut être valorisée dans une nouvelle filière de production de fibres de carbone.

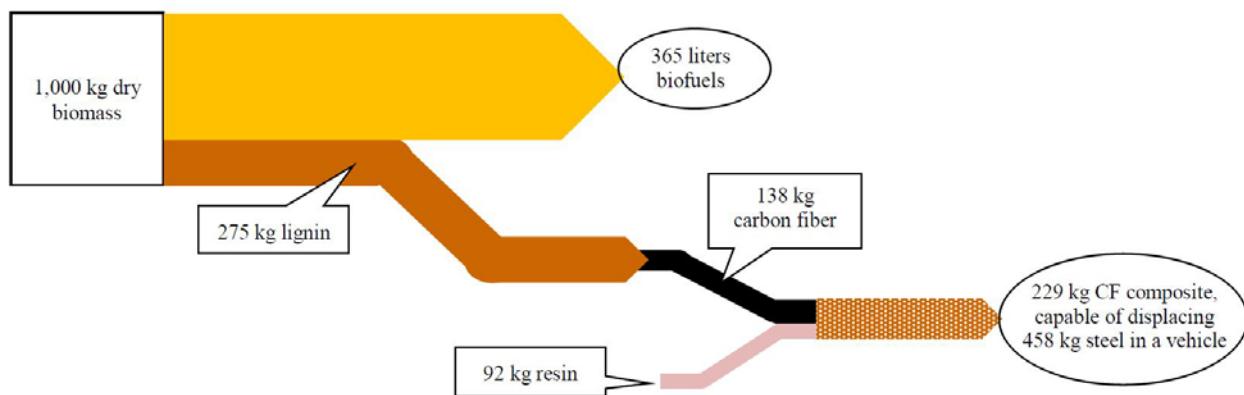


Figure 19. – Schéma de production de biocarburants, de fibre de carbone et de PRFC à partir de 1000Kg de biomasse.

Reproduction à partir de [21]

| Process Cost Category            | PAN-Based CF Cost Estimate (\$9.88/lb) | Lignin-Based CF Cost Estimate (\$3.71/lb) |
|----------------------------------|--|---|
| Precursors                       | \$ 5.04                                | \$ 0.50                                   |
| Stabilization and oxidation      | \$ 1.54                                | \$ 0.99                                   |
| Carbonization and graphitization | \$ 2.32                                | \$ 1.48                                   |
| Surface treatment                | \$ 0.37                                | \$ 0.33                                   |
| Spooling and packaging           | \$ 0.61                                | \$ 0.41                                   |

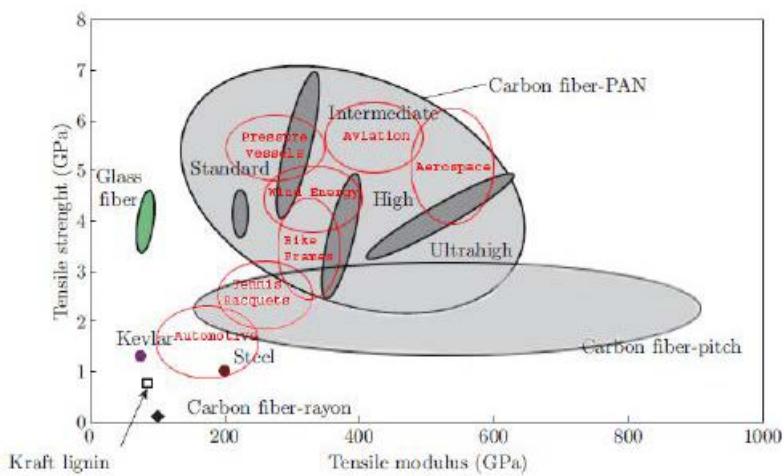
Source: Baker 2010, in 2010 dollars

Figure 20. – Coûts comparés de fibre de carbone à partir de lignine et de PAN..

Reproduction à partir de [4]

Comme le montre la figure 20, le coût théorique de la fibre de carbone à base de lignine serait de 2 à 3 fois moins important que pour une fibre produite à partir de PAN. On constate surtout que la différence se fait en grande partie sur le cout du précurseur lui-même, le PAN étant constituant plus de 50% du coût total de production et la lignine coûtant 10 fois moins cher, en plus de nécessiter des coûts plus faibles pour chaque étape de production, comparé à celle de fibre ex-PAN.

Mais comme on peut le voir sur la figure 21, les fibres produites jusque dans les années 2012-2013. Même si, comme le montre la figure 6, de bons progrès ont été faits jusqu'en 2021, les résultats obtenus ne permettent pas encore d'obtenir les mêmes propriétés que les fibres produites à base de PAN ou de Brai. L'utilisation de fibre de carbone produites à partir de lignine ne serait donc pas acceptable en l'état pour les utilisations de très haut niveau dans les industries aéronautiques ou spatiale. [4] Cela n'exclut pas pour autant que l'on puisse trouver une utilité dans d'autres industries.



Sources: Lin et al. 2013; Downing 2013; Dumanli and Windle 2012

Figure 21. – Propriété des fibres de carbone selon différents types de précurseurs.

Reproduction à partir de [4]

De 2016 à 2020, un programme de recherche européen appelé LIBRE avait pour objectif d'essayer d'explorer les possibilités de l'utilisation de la Lignine dans de nouveaux processus de production dans l'objectif de la rendre industrialisable et ainsi la rendre compétitive avec les fibres ex-PAN.

Comme on peut le lire dans la présentation de leur étude de cycle de vie présentée dans leur flyer résumant les conclusions de leur recherches, dont un extrait est présenté en Figure 22, les fibres composées d'un composé de Lignine sont moins cher d'environ 30%. D'un point de vue des besoins en énergie, ils sont à peu près divisés par deux et l'impact climatique est plus de deux fois moins important.

Même si ces graphiques ne croisent pas les données avec les caractéristiques techniques des fibres comparées, ils démontrent bien que l'utilisation de la Lignine en tant que précurseur pour la production de fibres de carbone est une alternative vraiment prometteuse, autant dans la perspective de ne pas utiliser d'hydrocarbures, que de devoir abaisser de façon drastique l'impact environnemental du matériau, notamment vis-à-vis de la demande en énergie.

### Life cycle analysis (LCA)

The LCA carried out within the LIBRE project has shown a clear energy and environmental benefits compared to the current carbon fibre production based on PAN.

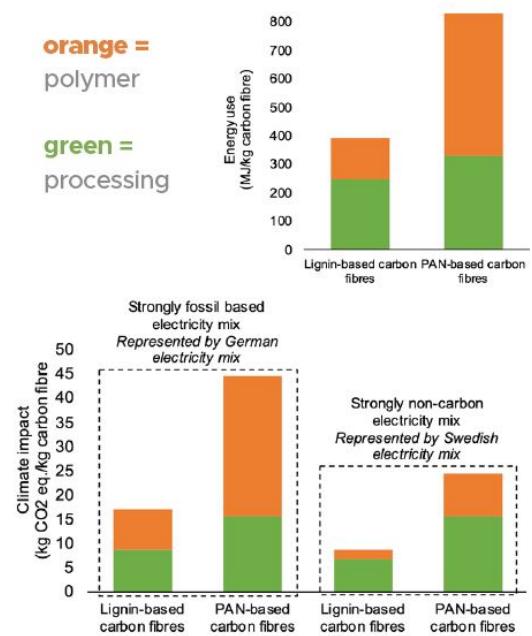
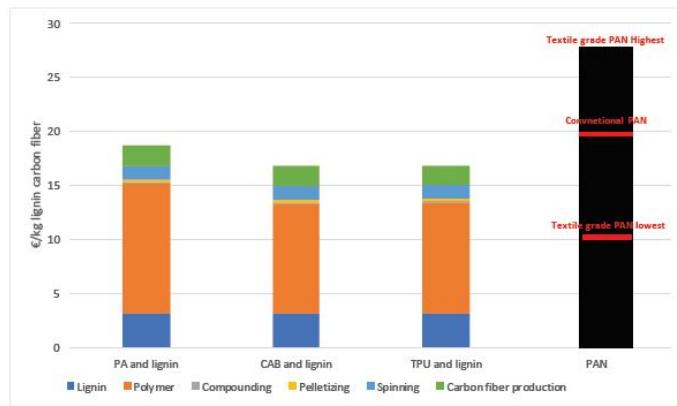


Figure 22. – Propriété des fibres de carbone selon différents type

Reproduction à partir de [22]

## II.3 – Les possibilités de recyclage de la fibre de carbone

Les fibres de carbone sont la plupart du temps mise en œuvre sous forme de rouleaux tissés, qui sont ensuite découpés pour être adapté à la tailles des pièces et des moules souhaités. Ainsi, même si il y a une réelle recherche d'optimisation des découpes, il reste toujours de nombreuses chutes provenant de ces découpes et s'accumulant sans pouvoir être utilisé.

Les matériaux composites sont souvent assez difficiles à recycler du fait de la difficulté de séparer ses différents composés, dans le cas des PRFC, il est en effet très difficile de séparer les fibres entrelacées de la matrice plastique dans laquelle elles ont été imprégnées et avec laquelle elle ne font qu'un. Pour autant, le recyclage et la fin de vie des matériaux composites est un véritable enjeux pour les années à venir, dans un contexte d'utilisation croissante de ces matériaux et de la question de leur traitement en fin de vie.

Aujourd’hui encore, malgré les efforts fournis, une grande partie des pièces démontées en matériau composites, comme par exemple les pales d'éoliennes, font l'objet d'un simple enfouissement, ce qui n'est évidemment pas un processus durable ni souhaitable vis-à-vis des ambitions environnementales et écologiques qu'elles sont censé représenter. Comme on peut le voir sur la figure 23, des images comme celles-ci sont malheureusement la réalité, et la possibilité de recourir à un recyclage des matériaux composites est tout à fait crucial pour que l'on n'ait plus à voir cela se produire sous nos yeux.



Figure 23. – Photo d'un champ d'enfouissement de pales d'éoliennes en fin de vie.

Reproduction à partir de [23]

Heureusement, de nombreuses équipes de recherche se sont penchées sur cette problématique et essayent de trouver des solutions. C'est le cas du processus innovant proposé par le projet Européen CIRCE, qui veut réclamer le retour de toutes les chutes inutilisées des produits de fibre de carbone afin de les valoriser. En plus d'éviter de jeter ces chutes, qui sont une valeur perdue pour l'entreprise, ce processus permet d'abaisser l'impact environnemental de l'industrie de façon significative. Les produits finis qu'ils sont en capacité de produire sont bien entendu de taille réduite et de qualité moindre en terme de performances comparé aux standards, mais peuvent être amplement suffisant pour certaines utilisations. [24]



**Figure 24. – Photo d'un rouleau de fibres de carbone recyclée.**

**Reproduction à partir de [25]**

Plusieurs entreprises, dont ELG Carbon Fibre, ont développé des processus industriels permettant de recycler les fibres de carbone. Comme pour le projet CIRCE, le processus a été développé dans un premier temps pour intégrer les chutes non utilisées provenant des usines de production de pièces en PRFC. Mais ils vont même plus loin en ayant intégré la possibilité de récupérer des pièces usagées, qu'ils passent dans une machine déchiqueteuse qui découpe les fibres en morceaux plus faciles à traiter. Un four permet ensuite de brûler la résine par pyrolyse. Les fibres libérées de leur matrice peuvent être ensuite mélangées aux chutes récupérées. Ces matériaux passent ensuite une série de traitement différents en fonction du produit fini attendu.

A la sortie, cette entreprise propose un matériau fini sous forme de rouleau, comme présenté sur la Figure 24, qui peuvent ensuite être utilisés dans la fabrication de nouvelles pièces composites ne nécessitant pas de grandes résistances, comme par exemple pour des pièces de voiture peu sollicitées tel que les châssis de véhicules. L'entreprise propose aussi différentes autres formes de fibres de carbone moins traitées, avec des morceaux en vrac qui peuvent servir à d'autres types de mise en œuvre, selon les besoins des clients. [25]



### III – Etude de cas

Comme nous l'avons vu dans la première partie, la fibre de carbone peut être mise en œuvre de multiples façons, et elle a trouvé quelques applications dans des mises en œuvre déjà bien connues, soit en remplaçant un matériau comme l'acier par la fibre de carbone, soit en utilisant des matériaux composites de type PRFC pour venir renforcer des structures existantes. Mais qu'en est-il des perspectives architecturales nouvelles qu'offre ce matériau ? Nous verrons dans cette dernière partie plusieurs études de cas de structures architecturales innovantes qui ouvrent le pas à l'introduction d'une utilisation plus large de la fibre de carbone dans le monde du bâtiment.

#### III.1 – Pavillons expérimentaux

Au sein de l'Université de Stuttgart, un programme d'enseignement au sein du "Institute for Computational Design and Construction" est tourné vers la recherche pluridisciplinaire en architecture et rassemble des étudiants venant de multiples branches d'enseignement, à savoir, notamment : l'ingénierie des matériaux, le Design, l'architecture, la biologie, l'informatique. Chaque année, un pavillon expérimental est construit avec une approche tout à fait unique mais avec des éléments constants : l'utilisation de fibres de verre et de carbone et de la résine, une interprétation structurelle bio-inspirée et la mise en œuvre grâce à la robotique. Nous allons en étudier quelques exemples. [26]

##### Pavillon de 2014

En 2014, l'équipe de recherche s'est basé sur la nanostructure de la carapace des scarabées pour développer le concept structurel du pavillon. Celle-ci est composée de deux membranes, séparées par des cavités qui sont structurées autour de formes polygonales. [27]

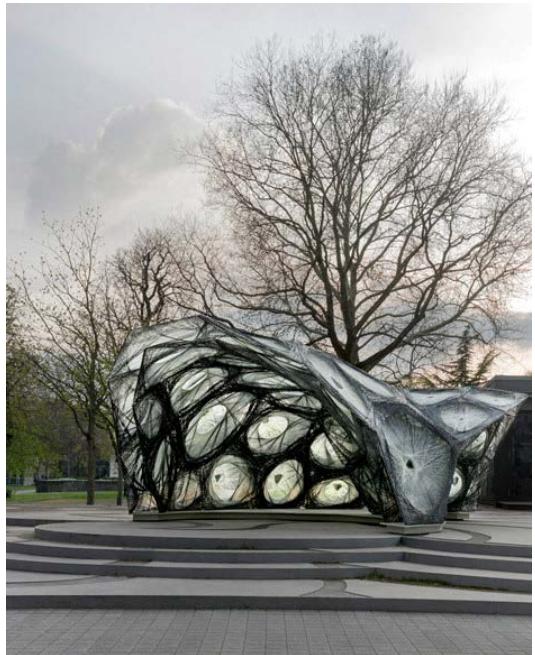


Figure 25. – A gauche - Photo du chantier  
A droite – Photo du pavillon fini

Reproduction à partir de [28]

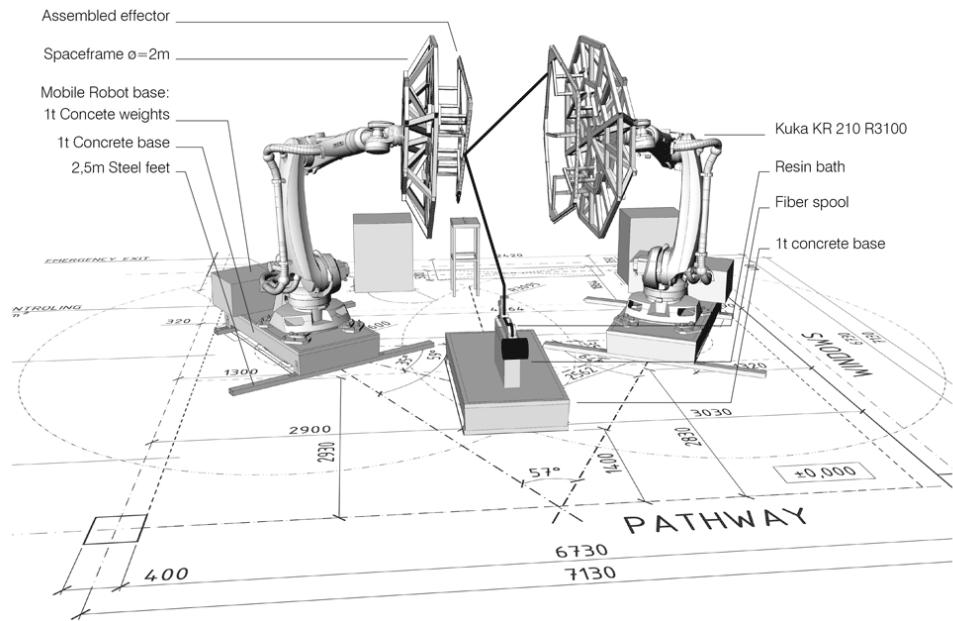


Figure 26. – Schéma du système robotique de mise en œuvre

Reproduction à partir de [28]

La Figure 26 illustre le fonctionnement de l'ensemble robotique utilisé pour la mise en œuvre des pièces. Deux bras robotiques se font face, sur lesquels sont attachées deux armatures. Celles-ci soutiennent le cadre sur lequel les fibres de verre et de carbone pré-imprégnées de résine seront déroulées au fur et à mesure. Les bras des robots ont leurs mouvements synchronisés, ils tournent, avancent et reculent de concert afin de dérouler les fibres points par points.

Chaque élément est constitué de structures transversales en fibre de verre, puis de carbone, et les côtés, le long des formes polygonales internes et externes qui reposeront les unes sur les autres sont ensuite renforcée sur leurs contours par plusieurs couches de fibres de carbones. Une fois tous produits, les éléments sont ensuite directement assemblés sur site.



Figure 27. – Photo des robots en train de travailler sur une pièces structurelle

Reproduction à partir de [28]

## Pavillon de 2015



Figure 28. – Schéma de la mise en œuvre du Pavillon

Reproduction à partir de [29]

Pour ce projet, l'inspiration était celle de la toile d'une araignée aquatique qui lui permet de se créer une bulle d'air et ainsi de plonger temporairement sous l'eau. Pour la mise en œuvre, l'idée de départ était donc de mettre le robot à l'intérieur d'une bulle gonflable, sur laquelle ce dernier déroulerait des filaments de fibres enduites sur la surface. Après plusieurs passages et la structure primaire consolidée, la bulle est dégonflée et le robot continue son passage sur les fibres déjà solidifiées. Les cheminement des fibres ont été réalisés à l'aide de modélisations très précises des forces qui s'exercent, permettant une optimisation de la forme et de la matière. Cette économie de matière est un gain important à bien des égards comparé à la mise en œuvre de la plupart des matériaux dans le bâtiment qui s'accompagne de beaucoup de déchet et de chutes, notamment par la nécessiter de découper les différents matériaux mis en œuvre.



Figure 29. – Photo du Pavillon en fin de construction

Reproduction à partir de [29]

## Pavillon de 2017



Figure 30. – Photos de la structure terminée

Reproduction à partir de [30]

La dernière structure a été confectionnée de façon encore plus atypique que les autres, en effet, en plus des bras robotiques et du dérouleur de fibre de carbone, un drone a été utilisé. Ce dernier a servi à amener la fibre d'un bout à l'autre de la pièce pour la dérouler en continu et l'apporter à l'un puis à l'autre des robots. Ceux-ci, une fois le drone posé sur son réceptacle, récupéraient la fibre pour la fixer au point d'accroche visé puis la redonner au drone, et ainsi de suite. Cette méthode a permis de construire, avec la même méthode de déroulement continu des fibres, un pavillon d'une envergure bien supérieure, ne se limitant ainsi plus uniquement à la zone du rayon du bras robotique.



Figure 31. – Photo du processus de construction

Reproduction à partir de [31]

### III.2 – Panneaux de façades de grande longueur

Pour le Stedelijk Museum à Amsterdam, l'agence d'architecture Benthem Crouwel Architects a conçu une coque gigantesque pour réaliser une extension en même temps que la rénovation du bâtiment existant. Cette extension, aujourd'hui surnommée "The bathtub", ou « La baignoire », dû à sa forme suggestive. Cette forme, se voulant moderne, devait être vue comme une invitation à la pénétrer pour y découvrir l'exposition d'art contemporain qu'elle renferme. Pour arriver à cet effet, les architectes souhaitaient créer une forme plastique qui paraîtrait la plus lisse et continue possible. Comme l'analyse Quang Truong dans son livre, cette volonté n'était réalisable que par l'utilisation de très petits éléments créant une masse uniforme par leur assemblage, ou bien par l'utilisation d'un matériau qui permettrait d'avoir les éléments les plus grands possibles avec lesquels on pourrait assez bien dissimuler les jonctions. Le matériau choisi pour les panneaux en finalité était donc une composition entre des fibres de carbones et de l'aramide. [27]



Figure 32. – Photo du bâtiment fini

Reproduction à partir de [27]

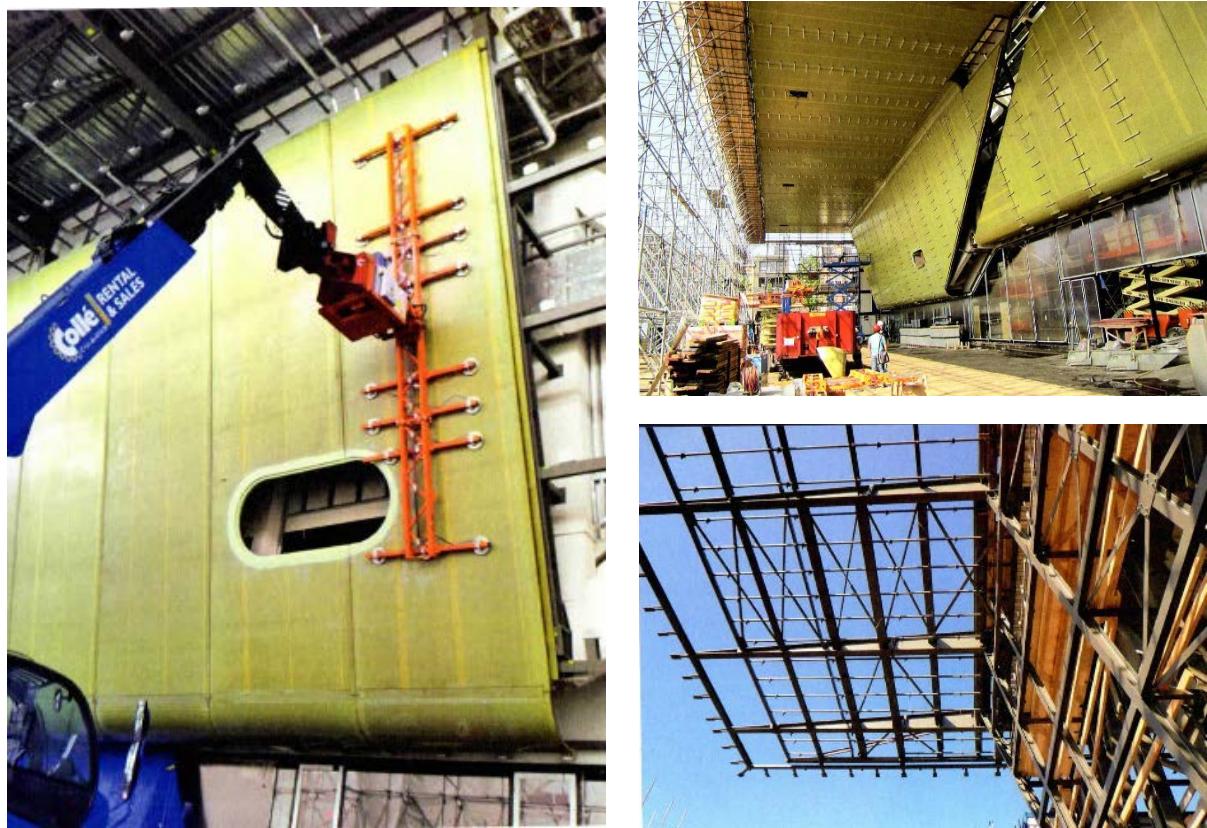


Figure 33 – Photos du chantier

Reproduction à partir de [27]

Comme nous pouvons le voir sur les images ci-dessus, la superstructure du bâtiment en lui-même est en structure métallique. La façade est composée d'une structure métallique légère et contreventée qui est ensuite recouverte par les éléments de façade en composite de fibres de carbone et d'aramide. Ces panneaux sont faits à base de deux membranes extérieures rigides en composite, au milieu desquels est enfermée une mousse dense en polyisocyanurate, permettant la résistance au feu. La Figure 34 ci-dessous illustre le système constructif du panneau.

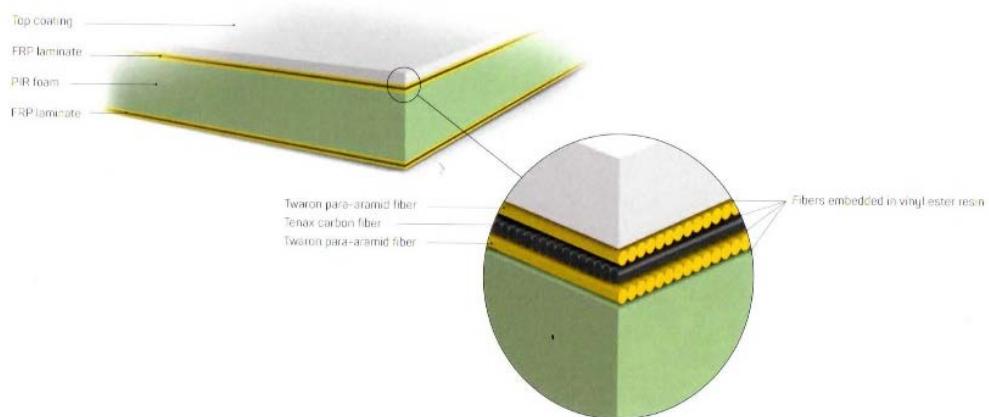


Figure 34. – Coupe schématique d'un panneau de façade

Reproduction à partir de [27]

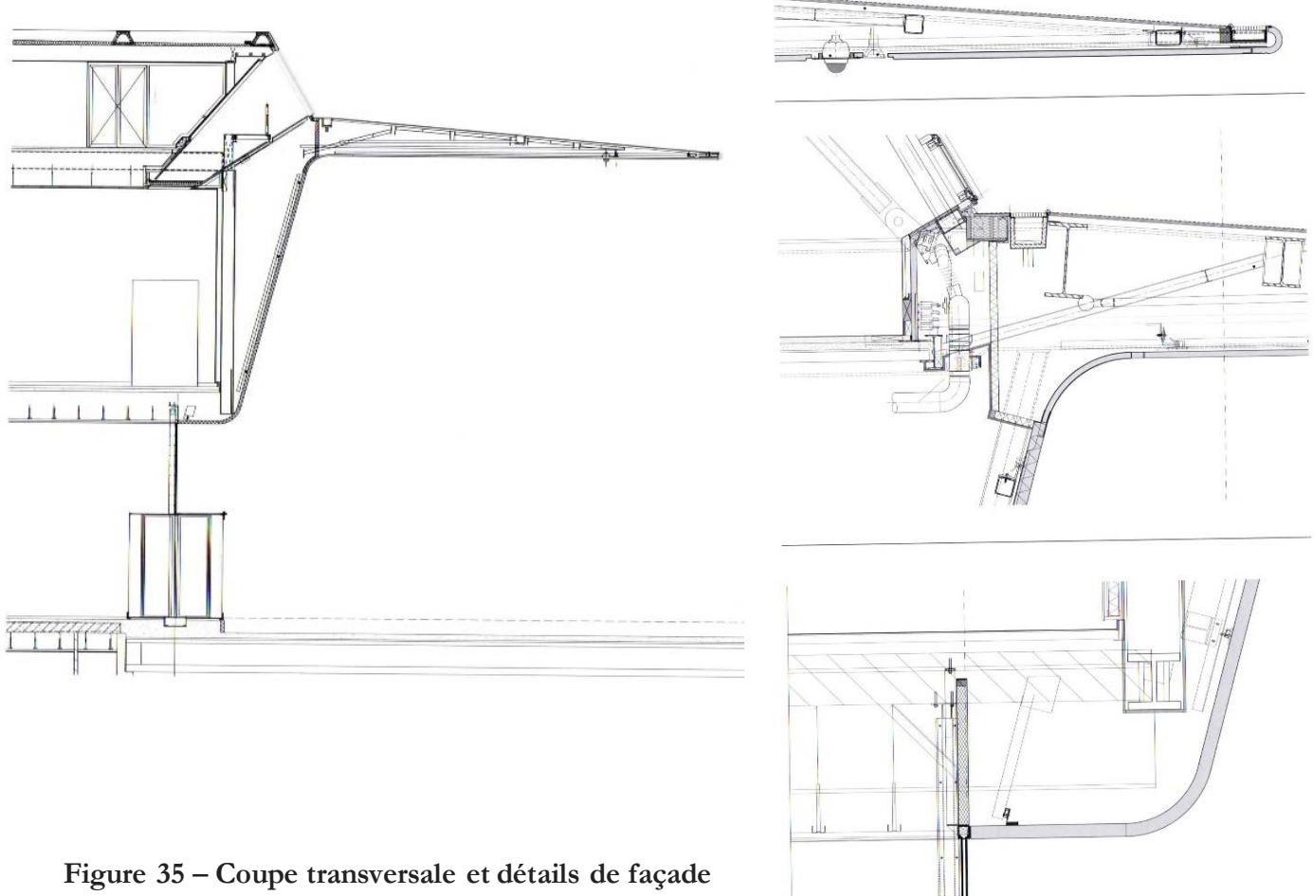


Figure 35 – Coupe transversale et détails de façade

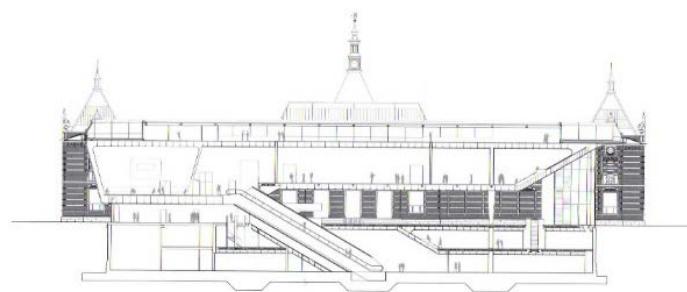
Reproduction à partir de [27]

Les coupes et les élévations sur les figures 35 et 36 illustrent bien la finesse de la casquette du bâtiment, élément architectural assez inhabituel et qui ne peut que laisser perplexe au premier regard. Dans le cadre d'un bâtiment exceptionnel comme celui-ci, qui se veut être la proue d'un grand musée d'art contemporain, suscitant la curiosité des passant et des visiteurs, il est évident que les moyens mobilisés pouvaient être supérieurs. Ainsi, cet exemple démontre comment la volonté de laisser s'exprimer la liberté architecturale et formelle permet aussi de produire des innovations et d'ouvrir de nouvelles possibilités architecturales.

Le travail sur les détails et sur les matériaux, dans ce cas, s'est fait dans un partenariat très approfondi entre les architectes, les ingénieurs et les différentes entreprises produisant des composites renforcés et capable de fournir le genre de produits recherchés. Ces panneaux de façades sont ainsi issus d'un processus de travail pluridisciplinaire entre différents corps de métier.

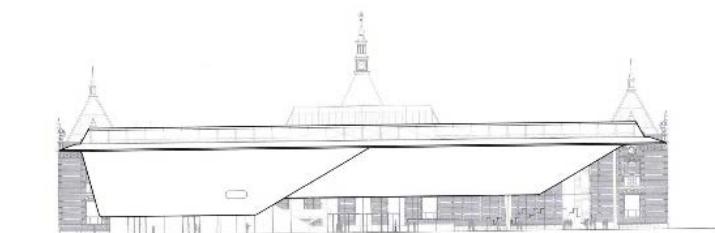


Longitudinal section.

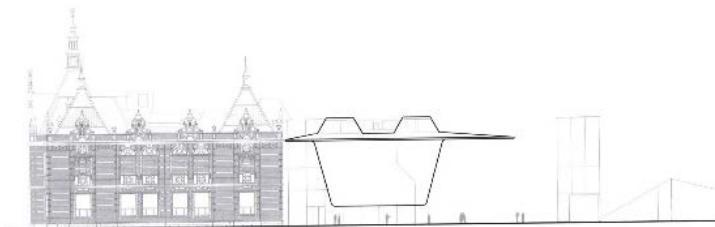


0 25 50 75 100 m

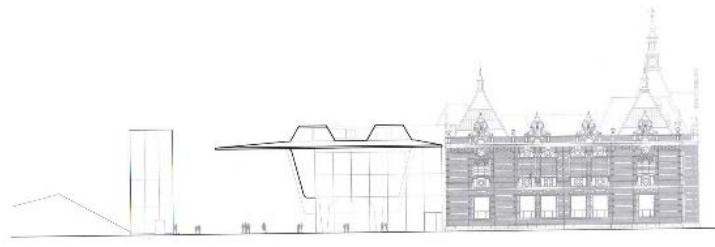
South elevation. 00



West elevation.



East elevation.



0 25 50 75 100 m

**Figure 36 – Coupes et élévations**

Reproduction à partir de [27]

### III.3 – Structures de toitures légères

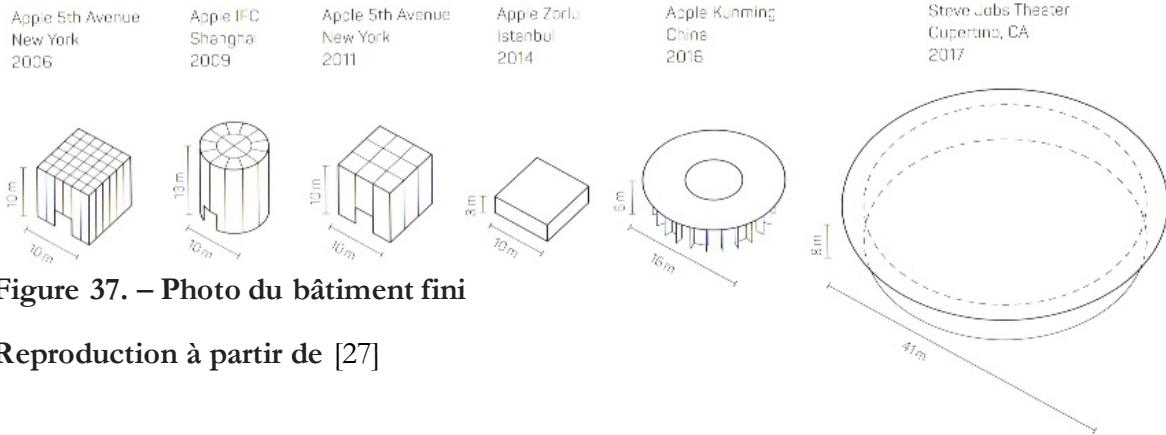


Figure 37. – Photo du bâtiment fini

Reproduction à partir de [27]

Apple est avant tout connue pour être une des entreprises les plus à la pointe de la technologie numérique. Mais elle est aussi bien connue pour les bâtiments dans lesquels elle vend ses produits : les Apple-Stores. La recherche du Design le plus épuré possible et de l'utilisation des technologies les plus pointues ont toujours fait partie de l'ADN d'Apple. Ainsi, on retrouve cet esprit minimalisté autant dans leurs produits numériques que dans l'architecture de leurs bâtiments.

L'aspect architectural des Apple store a toujours été dans la recherche de la transparence la plus grande de ses vitrines et l'expression structurelle la plus fine possible suggérant la légèreté, avec des prouesses recherchées sur les dimensions des vitres, ainsi que sur les qualités des verres utilisés. Depuis 2006, Apple, dans un partenariat de long terme notamment avec l'architecte Norman Foster, a construit différents bâtiments avec des murs en verre structurel et des toitures en matériaux composites à base de fibre de carbone.



Figure 38. – Photo extérieure du Steve Jobs Theater, à Cupertino

Reproduction à partir de [27]



Figure 39. – Photo extérieure de l'Apple Store de Kunming, en Chine

Reproduction à partir de [27]

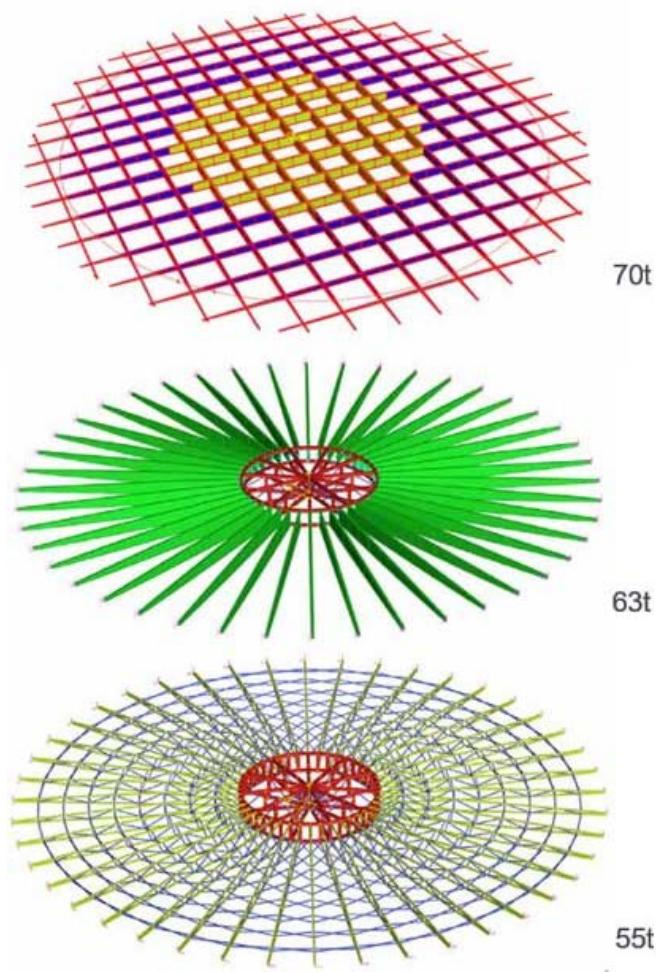


Figure 40. – Photo extérieure de l'Apple Store Zorlu à Istanbul

Reproduction à partir de [32]

Sur la figure 37, Quang Truong met en perspective l'ensemble des bâtiments d'Apple sortis de Terre depuis 2006 qui ont pour principe structurel du verre porteur en façade et une structure légère en toiture. On peut voir que la portée des bâtiments construits est passée de 10m en 2006 à 41m en 2017. Cet élan dans l'utilisation de matériaux composites de type PRFC dans la structure de toitures légères et fines, comme on peut le constater sur les figures 38, 39 et 40, représentants respectivement le Steve Jobs Theater, l'Apple Store de Kunming ainsi que l'Apple Store de Zorlu, ouvre une nouvelle porte dans les possibilités d'expression architecturale et dans le choix des matériaux pour l'avenir.

D'autre part, l'utilisation de modélisations structurelles poussées dans le cadre de l'étude de la toiture du Steve Jobs Theater, illustré sur la Figure 41, est un bel exemple de la facilité d'optimiser les structures que permet l'utilisation de matériaux composites à base de fibre de carbone. En effet, les éléments sont confectionnés sur mesures, et peuvent, selon les besoins, être mis en œuvre de différentes manières pour correspondre au mieux aux attentes structurelles formalisées par les optimisations paramétriques.



**Figure 41. – Modélisations paramétriques de l'optimisation structurelle de la toiture du Steve Jobs Theater**

Reproduction à partir de [33]

### III.4 – Des câbles en fibre de carbone



Figure 42. – Photo du bâtiment terminé

Reproduction à partir de [27]

On pourrait croire de prime abord que les câbles formant une sorte de voile à l'avant de la façade de ce projet ont un intérêt purement et simplement esthétique, pourtant ils sont une partie intégrante de la structure. Dans ce projet, dessiné par les équipes de l'agence d'architecture de Kengo Kuma, situé à Nomi au Japon, un des objectifs principaux de la réhabilitation du bâtiment était de lui donner une résistance accrue aux séismes. L'entreprise pour laquelle les bureaux sont réhabilités produit justement des câbles en fibre de carbone, il allait donc de soi pour les architectes de rechercher une utilisation nouvelle de ces câbles dans la construction du bâtiment. [27]

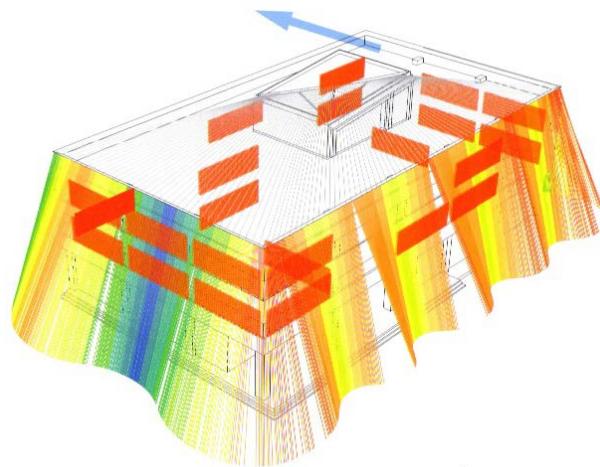


Figure 43. – Diagramme de résistance à un effort latéral

Reproduction à partir de [27]

Pour la stabilisation du bâtiment, il a donc été décidé d'utiliser à la fois des panneaux qui permettent la transmission des forces d'un étage à l'autre, ainsi que les câbles tendus depuis le haut de la façade pour reporter les charges au sol. Sur la Figure 43, on peut voir la réaction de chacun des éléments dans le cas d'un effort extérieur latéral. Les panneaux sont fabriqués avec une méthode locale croisant les fibres dans un sens et dans l'autre de part et d'autre d'un cadre rectangulaire. Ce dernier ajoute de la rigidité latérale aux étages, dont la structure porteuse initiale est en poteaux-poutres en béton armé. Ces derniers, placés en façade et aussi à quelques endroits au cœur du bâtiments, permettent la transmission des forces tout en laissant passer la lumière depuis les fenêtres.

Ces deux nouvelles utilisations structurelles de la fibre de carbone sont détaillées dans la Figure 44. Elles proposent des possibilités architecturales inspirantes qui prennent en compte les caractéristiques techniques poussées des fibres de carbone. Ce bâtiment, même s'il s'apparente plutôt à un prototype expérimental, ouvre la voie vers des possibilités plus grande pour ce matériau.



Section detail of exterior carbon fiber structure at roof and foundation.

- 1 Galvanized washer
- 2 Threaded bolt
- 3 Adhesive filled carbon fiber rod receiving sleeve
- 4 Carbon fiber rod
- 5 Steel plate
- 6 Anchors bolt
- 7 Steel strut
- 8 Sheath tube
- 9 Turnbuckle
- 10 Foundation lift prevention
- 11 Floor level -1100
- 12 Floor level -500

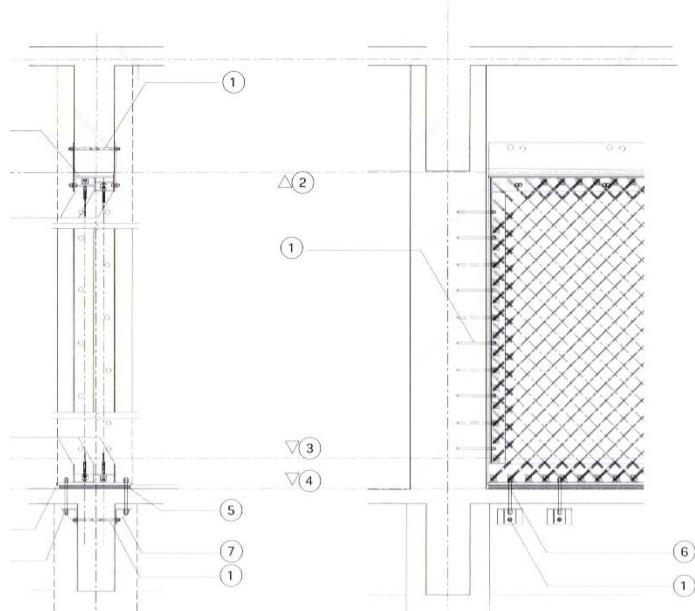
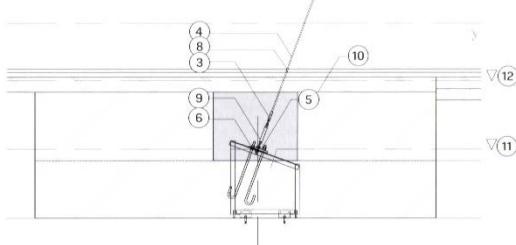
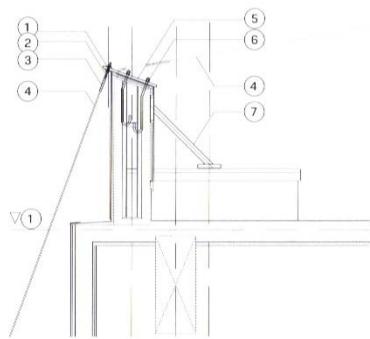


Figure 44. – Photos et détails de fixation des panneaux et des câbles

Reproduction à partir de [27]



## Conclusion

La fibre de carbone est un matériau finalement assez récent qui offre une palette très large de développement de nouveaux modes de construction, quand on s'intéresse à ses caractéristiques techniques. Malgré son haut potentiel qui est aussi lié à son anisotropie, il nécessite des mises en œuvres particulièrement complexes, il reste encore assez peu répandu et sous-utilisé. Sa mise en œuvre dans les matériaux composites, comme les polymères renforcés en fibre de carbone (PFRC) a permis de mettre en valeur ce matériau et de rationaliser son utilisation pour obtenir des matériaux finalement plus performants. Plusieurs techniques de mise en œuvre ont été développées, permettant plus ou moins l'intégration à des chaînes industrielles. La recherche appliquée permet dans les domaines de pointe de développer des processus de fabrication sur mesure pour convenir aux besoins précis identifiés. En architecture, et dans le bâtiment en général, la recherche appliquée se concentre davantage sur l'optimisation de processus constructifs déjà connus afin de développer des caractéristiques spécifiques ou bien en intégrant un nouveau matériau. Nous avons vu comment l'utilisation de composites de type polymère renforcés en fibre de carbone a d'abord été envisagée dans une utilisation mimétique des mises en œuvre que nous connaissons et maîtrisons avec d'autres matériaux.

La fibre de carbone n'est pas compétitive d'un point de vue financier, et ne paraît pas dans l'état actuel des choses être un matériau vertueux d'un point de vue environnemental. On constate que le marché est en plein expansion et que les prix ont l'air d'être sur une légère tendance à la baisse, mais il cela est dû en partie aux économies d'échelle induites par la production de masse. Le prix de la fibre de carbone dépendant beaucoup du prix des hydrocarbures, cet avenir de la baisse des prix reste incertain et volatile. Cependant, nous assistons à un réel élan de la recherche pour une transition de l'industrie chimique de l'utilisation des hydrocarbures à celle de matériaux biosourcés. La lignine se révèle être un candidat prometteur à bien des égards pour la production de fibre de carbone. Même si les caractéristiques techniques sont encore moindre comparé aux fibres issues des hydrocarbures, elle permet à la fois de reposer sur un matériau biosourcé qui mérite d'être valorisé, tout en abaissant les coûts de production de façon drastique. S'ajoute à cette perspective de vrais circuits industriels de recyclage des chutes de l'industrie et des produits en fin de vie.

Il existe tout de même déjà des bâtiments qui ont recours à la fibre de carbone pour des utilisations très spécifiques. Ce sont dans la plupart des cas des situations exceptionnelles de partenariat avec des entreprises industrielles, qui souhaitent que la fibre de carbone puisse enfin trouver sa place dans la construction de bâtiments. On constate que ces bâtiments prototypes sont à la pointe de la remise en question des formes architecturales, en prenant en compte différents aspects de ce qui est rendu possible par les propriétés de la fibre de carbone et l'étendue des alternatives de sa mise en œuvre. L'utilisation de la fibre de carbone dans la construction de bâtiments est d'ores et déjà une réalité, et les perspectives d'avenir qu'offre ce matériau promettent des possibilités et des opportunités plus vastes encore. La recherche en architecture aurait tout son rôle à jouer dans les réflexions sur les retombées possibles de l'utilisation de nouveaux matériaux. La richesse que produit le développement de projet dans un cadre pluridisciplinaire dans le cas de la construction des différents pavillons expérimentaux au sein de l'université de Stuttgart montre que des résultats concrets sont possibles quand on s'en donne les moyens. Cela devrait nous amener à réfléchir davantage sur nos propres pratiques et inspirer plus de financement de l'architecture, de la recherche, mais avant tout des rapprochements disciplinaires nécessaires pour relever les grands défis sociaux et environnementaux du XXI<sup>ème</sup> siècle.

## Bibliographie

- [1] « Fibres de carbone », *L'Élementarium*. <https://lelementarium.fr/product/fibres-de-carbone/> (consulté le 10 janvier 2022).
- [2] X. Huang, « Fabrication and Properties of Carbon Fibers », *Materials*, vol. 2, n° 4, p. 2369-2403, déc. 2009, doi: 10.3390/ma2042369.
- [3] B. A. Newcomb, « Processing, structure, and properties of carbon fibers », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 91, p. 262-282, déc. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.10.018.
- [4] A. Milbrandt et S. Booth, « Carbon Fiber from Biomass », NREL/TP-6A20-66386, 1326730, sept. 2016. doi: 10.2172/1326730.
- [5] E. Fitzer, K.-H. Kochling, H. P. Boehm, et H. Marsh, « Recommended terminology for the description of carbon as a solid (IUPAC Recommendations 1995) », *Pure Appl. Chem.*, vol. 67, n° 3, p. 473-506, janv. 1995, doi: 10.1351/pac199567030473.
- [6] S. Wang *et al.*, « Lignin-based carbon fibers: Formation, modification and potential applications », *Green Energy Environ.*, p. S2468025721000686, avr. 2021, doi: 10.1016/j.gee.2021.04.006.
- [7] S.-J. Park, *Carbon Fibers*, vol. 210. Singapore: Springer Singapore, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0538-2.
- [8] K. Drechsler *et al.*, « Carbon Fiber Reinforced Composites », in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Éd. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, p. m05\_m02. doi: 10.1002/14356007.m05\_m02.
- [9] « Moulage par infusion sous vide », *Wikipédia*. 2 juin 2019. Consulté le: 11 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Moulage\\_par\\_infusion\\_sous\\_vide&oldid=159781559](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Moulage_par_infusion_sous_vide&oldid=159781559)
- [10] « Can I build something from carbon fiber without an autoclave? », *Quora*. <https://www.quora.com/Can-I-build-something-from-carbon-fiber-without-an-autoclave> (consulté le 11 janvier 2022).
- [11] NASA's Marshall Space Flight Center, *Manufacturing A Large Composite Rocket Fuel Tank*, (20 mars 2014). Consulté le: 11 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=jc52ssQ65cU>
- [12] « Renforcement par Plats Carbone », *CARON DEMOLITION*. <https://www.caron-demolition.fr/renforcement-par-plats-carbone/> (consulté le 11 janvier 2022).
- [13] « Concrete Repair | Carbon Fibre Reinforcement | CPR Australia ». <https://cpraustralia.com.au/services/carbon-fibre-reinforcement/> (consulté le 11 janvier 2022).
- [14] « Carbon Fiber Building Material | Element 6 Composites », <https://element6composites.com/>. <https://element6composites.com/carbon-fiber-applications/carbon-fiber-trusses-beams/> (consulté le 11 janvier 2022).
- [15] « Fibre-reinforced plastic may reduce the costs of bridges », *SINTEF*. <https://www.sintef.no/en/latest-news/2018/fibre-reinforced-plastic-may-reduce-the-costs-of-bridges/> (consulté le 8 mars 2022).
- [16] *High Performance Synthetic Fibers for Composites*. Washington, D.C.: National Academies Press, 1992, p. 1858. doi: 10.17226/1858.
- [17] « Composites Marktbericht Gesamt ». [https://www.avk-tv.de/files/20160427\\_composites\\_marktbericht\\_gesamt.pdf](https://www.avk-tv.de/files/20160427_composites_marktbericht_gesamt.pdf) (consulté le 11 janvier 2022).
- [18] « Cours et Prix des matières premières - CommoPrices ». <https://commoprices.com/fr/series> (consulté le 8 mars 2022).

- [19] T. Ellringmann, C. Wilms, M. Warnecke, G. Seide, et T. Gries, « Carbon fiber production costing: a modular approach », *Text. Res. J.*, vol. 86, n° 2, p. 178-190, janv. 2016, doi: 10.1177/0040517514532161.
- [20] R. A. Sullivan, « Automotive carbon fiber: Opportunities and challenges », *JOM*, vol. 58, n° 11, p. 77-79, nov. 2006, doi: 10.1007/s11837-006-0233-3.
- [21] M. Langholtz *et al.*, « Lignin-Derived Carbon Fiber as a Co-Product of Refining Cellulosic Biomass », *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 7, n° 1, p. 115-121, janv. 2014, doi: 10.4271/2013-01-9092.
- [22] « Lignin Based Carbon Fibres for Composites | LIBRE Project | Fact Sheet | H2020 | CORDIS | European Commission ». <https://cordis.europa.eu/project/id/720707> (consulté le 21 mars 2022).
- [23] « Les éoliennes, symbole fort de l'écologie, sont-elles si vertes que cela ? », RTBF. <https://www.rtbf.be/article/les-eoliennes-symbole-fort-de-l-ecologie-sont-elles-si-vertes-que-cela-10640241> (consulté le 11 mars 2022).
- [24] I. Bianchi, A. Forcellese, M. Marconi, M. Simoncini, A. Vita, et V. Castorani, « Environmental impact assessment of zero waste approach for carbon fiber prepreg scraps », *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 29, p. e00308, sept. 2021, doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00308.
- [25] M. Holmes, « Recycled carbon fiber composites become a reality », *Reinf. Plast.*, vol. 62, n° 3, p. 148-153, juin 2018, doi: 10.1016/j.repl.2017.11.012.
- [26] « Cluster of Excellence IntCDC: Integrative Computational Design and Construction for Architecture | News | Jan 1, 2023 | Institute for Computational Design and Construction | University of Stuttgart ». <https://www.icd.uni-stuttgart.de/news/Cluster-of-Excellence-IntCDC-Integrative-Computational-Design-and-Construction-for-Architecture/> (consulté le 21 mars 2022).
- [27] Quang Truong, *Composite Architecture*. Birkhäuser, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1515/9783035619522>
- [28] « University of Stuttgart unveils woven pavilion based on beetle shells », *Dezeen*, 26 juin 2014. <https://www.dezeen.com/2014/06/26/icd-itke-pavilion-beetle-shells-university-of-stuttgart/> (consulté le 21 mars 2022).
- [29] « Gallery of ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15 / ICD/ITKE University of Stuttgart - 29 », *ArchDaily*. <https://www.archdaily.com/770516/icd-itke-research-pavilion-2014-15-icd-itke-university-of-stuttgart/55acef02e58ece12db000248-icd-itke-research-pavilion-2014-15-icd-itke-university-of-stuttgart-conceptual-fabrication-strategy-1-inflated-pneumatic-membrane-2-robotically-reinforce-membrane-with-carbon-fiber-from-inside-3-stable-composite-shell> (consulté le 21 mars 2022).
- [30] « Drones and robots weave carbon-fibre pavilion based on moth webs », *Dezeen*, 12 avril 2017. <https://www.dezeen.com/2017/04/12/icd-itke-research-pavilion-university-stuttgart-germany-carbon-fibre-robots-drones/> (consulté le 21 mars 2022).
- [31] « ICD/ITKE Research Pavilion », *Federico Forestiero*. [https://federicoforestiero.com/portfolio/icd\\_itke\\_research\\_pavilion/](https://federicoforestiero.com/portfolio/icd_itke_research_pavilion/) (consulté le 21 mars 2022).
- [32] F. + P. / [www.fosterandpartners.com](http://www.fosterandpartners.com), « Apple Fifth Avenue | Foster + Partners ». <https://www.fosterandpartners.com/projects/apple-fifth-avenue/> (consulté le 21 mars 2022).
- [33] « Eckersley O'Callaghan - Engineers - ». <https://www.eocengineers.com/en/projects/steve-jobs-theater-293> (consulté le 21 mars 2022).