

Polymères renforcés de fibres obtenus par fabrication additive

Antoine PUJOL

Édité le
01/09/2025

école
normale
supérieure
paris-saclay

Cette ressource est issue du travail personnel de Antoine PUJOL, élève en Master 1 Mécanique des Matériaux et des Structures au département Génie Mécanique de l'ENS Paris-Saclay. Ce texte a été relu par Federica DAGHIA, enseignante chercheuse à l'ENS Paris-Saclay.

Depuis une vingtaine d'années, la recherche dans le domaine de la fabrication additive s'est intensifiée. L'impression 3D suscite un intérêt grandissant chez les industriels grâce à sa capacité à fabriquer les pièces aux formes complexes, à moindre coût, tout en optimisant l'utilisation de la matière. De ce fait, de nombreuses applications voient le jour aujourd'hui dans des secteurs variés tels que l'aérospatial, automobile, biomédical ou encore l'architecture (cf. Figure 1) [1].

Diverses technologies de fabrication additive existent actuellement [2]. Leur différence repose principalement sur l'état initial du matériau utilisé (liquide, poudre, solide) et sur la manière dont les couches de matière sont générées. Le dépôt de fil fondu ou Fused deposition modeling (FDM) est l'un des procédés d'impression 3D les plus utilisés. En raison de sa simplicité, cette méthode de fabrication additive est depuis récemment accessible au grand public. Le FDM fabrique des pièces en polymère (ABS, polyamide, PLA, etc.) ce qui le rend idéal pour le prototypage rapide [2].

L'utilisation de thermoplastiques pour la fabrication additive par dépôt de fil fondu constitue l'une des principales faiblesses du procédé. En effet, ces polymères présentent des caractéristiques mécaniques bien inférieures aux matériaux traditionnels (acier, aluminium, ...). Ainsi, dans le but de concevoir des pièces à hautes caractéristiques mécaniques par impression 3D, les recherches à propos des polymères renforcés de fibres se sont intensifiées [3]. L'intégration de fibres dans le polymère a pour objectif de renforcer les propriétés mécaniques du thermoplastique. Le matériau obtenu appartient alors à famille des Composites à Matrice Organique (CMO) [4].

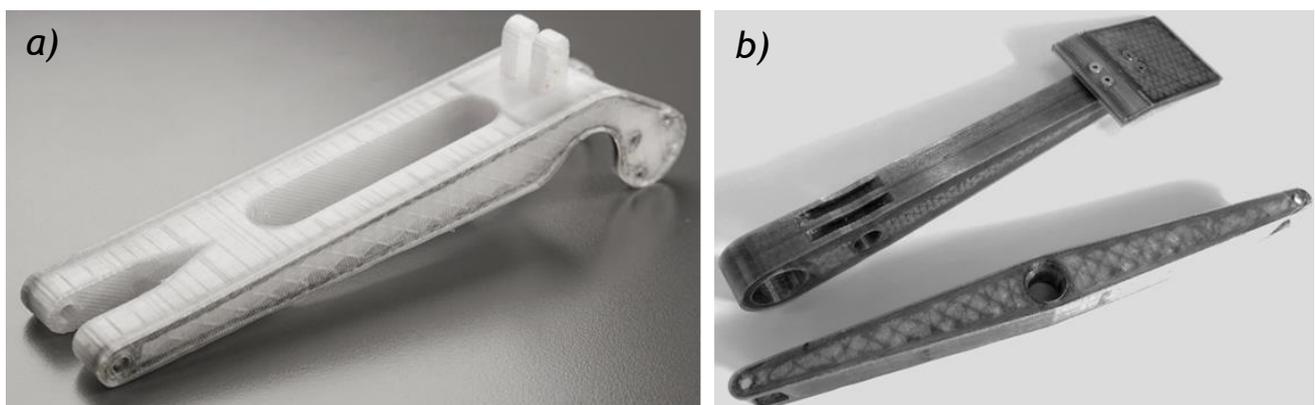


Figure 1 : a) Composant de suspension d'un rover lunaire ; b) Pédale de frein et bras de fusée pour le sport automobile en composite polymère renforcé de fibre [5]

Les caractéristiques des fibres utilisées jouent un rôle primordial dans les propriétés finales du CMO. Leur taille est un élément prépondérant dans la rigidité du composite, c'est-à-dire la valeur du module d'Young E . La carte d'Ashby (cf. Figure 2) compare les différents matériaux en fonction

de leur module d'Young et de leur masse volumique. Le rapport raideur sur masse étant un indicateur de la performance d'une matière, la carte d'Ashby permet de choisir un matériau en fonction des caractéristiques mécaniques nécessaires à l'application. Les polymères renforcés de fibres courtes (SFRP : Short Fiber Reinforced Polymer) présentent un module d'Young faible, ce qui les range aux côtés des polymères. Tandis que les polymères renforcés de fibres longues obtenus par FDM, notés CFRP FDM (CFRP : Continuous Fiber Reinforced Polymer) dans la carte d'Ashby (cf. Figure 2), sont catégorisés parmi les composites car davantage raides. Ce graphe indique également une raideur légèrement moindre des CFRP FDM comparée à celle des composites stratifiés standards actuellement utilisés en industrie. Ainsi, les domaines d'application diffèrent pour ces matériaux obtenus par FDM : le prototypage pour les SFRP et les structures pour les CFRP.

La notation utilisée dans la suite de cet article pour les polymères renforcés de fibres longues obtenus par FDM est restreinte à CFRP.

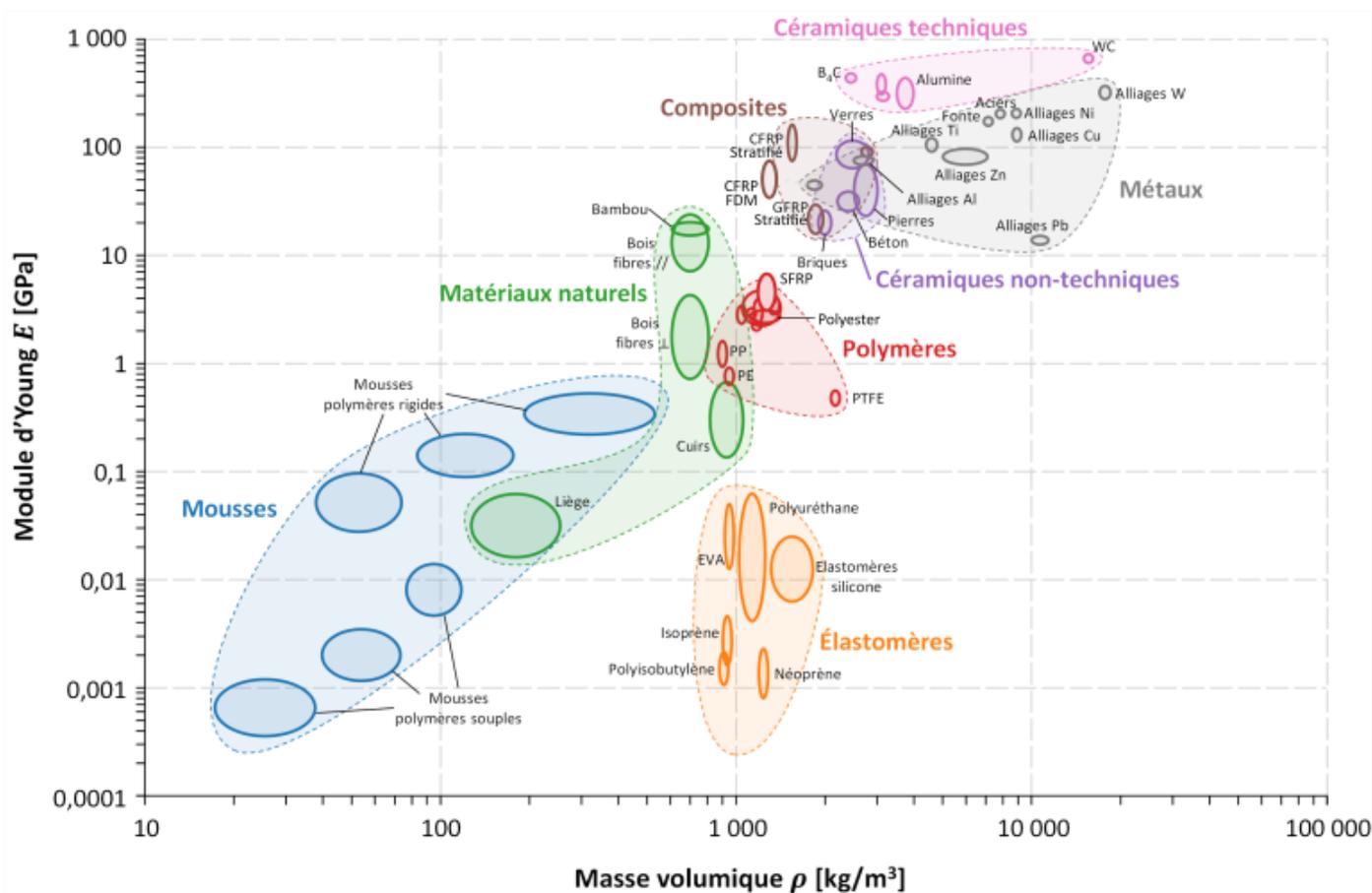


Figure 2 : Diagramme d'Ashby ¹ [6]

Cette ressource présente les deux types de polymères renforcés obtenus par FDM : les polymères renforcés de fibres courtes (SFRP) et longues (CFRP). Les matériaux utilisés, les procédés de fabrication et les problématiques inhérentes à chaque type de composite y sont décrits. Enfin, du fait de leur probable application industrielle, nous aborderons la complexité du comportement de des polymères renforcés de fibres longues (CFRP) qui est encore à l'étude par les chercheurs.

Un glossaire est disponible en fin de document.

¹ Ici CFRP Stratifié et GFRP Stratifié signifient respectivement Polymère Renforcé de Fibre de Carbone Stratifié et Polymère Renforcé de Fibre de Verre Stratifié

1 - Polymère renforcé de fibres courtes (SFRP)

Dans le but de renforcer les caractéristiques mécaniques du polymère, une première solution est d'introduire dans la matrice des fibres courtes. L'idée est similaire à celle utilisée dans le béton fibré (cf. Figure 3 a). La dispersion des fibres dans la matrice consolide l'ensemble du matériau.

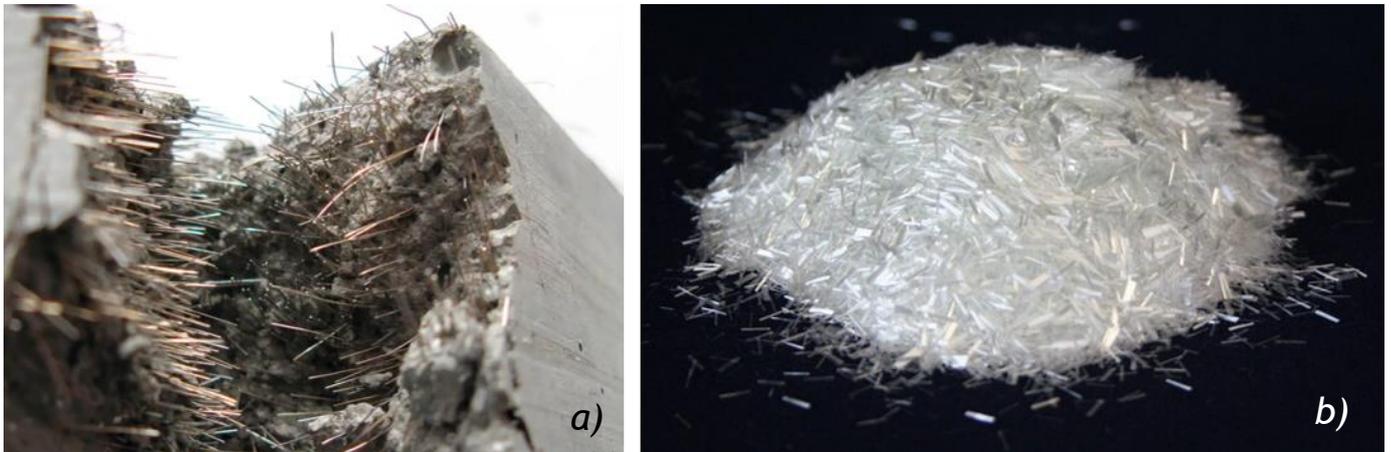
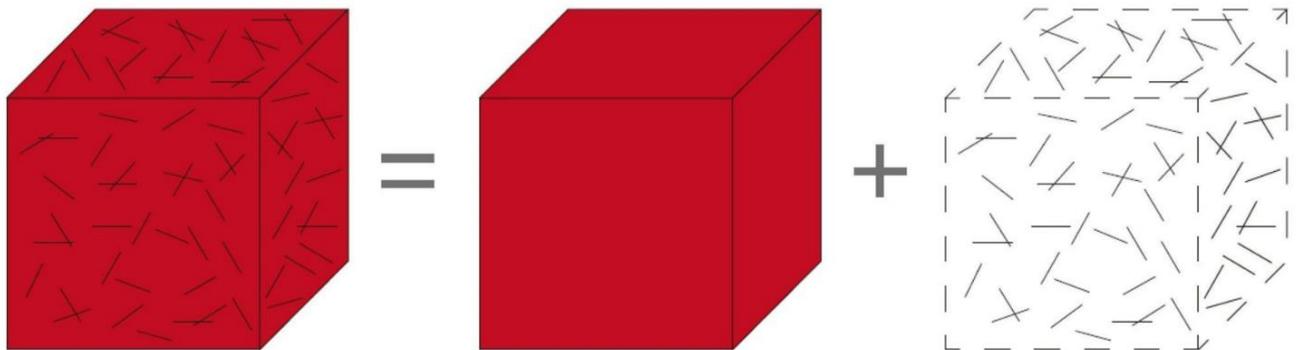


Figure 3 : a) Béton fibré [7] ; b) Fibres de verre courtes [8]

1.1 - Le matériau

La matrice thermoplastique constitue la majeure partie du composite. Il s'agit d'un polymère thermoplastique classique tel que le PLA (acide polylactique), ABS (acrylonitrile butadiène styrène), nylon. Une fois chauffé, il devient mou et malléable puis il se solidifie en refroidissant.

Les fibres courtes sont caractérisées par leur taille et leur matière (cf. Figure 3 b). En ce qui concerne la géométrie, les renforts ont un diamètre de 5 à 10 μm et une longueur allant de quelques micromètres à quelques millimètres. Les matériaux utilisés sont ceux des renforts dans les composites stratifiés. Ils sont sélectionnés pour leur rapport rigidité-légèreté performant. Il s'agit de fibre de verre, de carbone ou de kevlar.



Polymère renforcé de fibres courtes

Matrice polymère

Fibres courtes

Figure 4 : Schéma d'un brut de polymère renforcé de fibres courtes [9]

Le matériau se présente alors sous la forme d'une bobine de fil composée de la matrice thermoplastique dans laquelle les fibres de renfort sont mélangées uniformément (cf. Figure 4). La proportion de filaments dans la matrice est située entre 5 et 35% de la masse totale.

1.2 - Fabrication

La confection d'un composite polymère renforcé de fibres courtes par dépôt de fil fondu est identique au procédé classique présenté dans la ressource [2]. Ce matériau ne nécessite donc pas de machine d'impression spécifique. Le filament décrit précédemment est chauffé dans la buse. Le thermoplastique fond alors et la pièce est extrudée par le déplacement de la buse d'impression (cf. Figure 5).

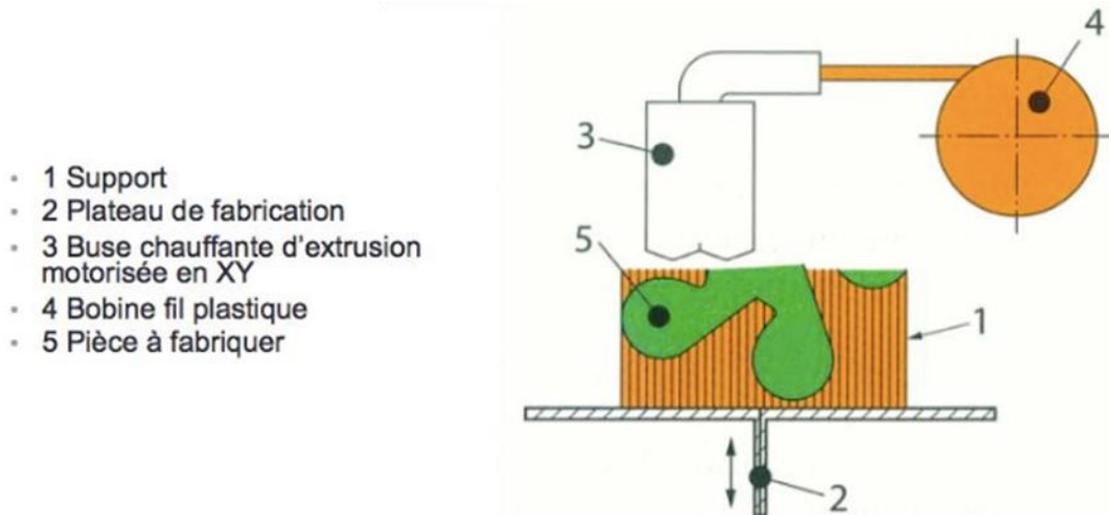


Figure 5 : Principe du procédé de dépôt de fil fondu [2]

1.3 - Problématiques liées aux SFRP

L'utilisation de petites fibres dans le polymère a pour objectif d'augmenter les caractéristiques mécaniques de celui-ci. Cependant, l'introduction de ces composés rend la maîtrise des propriétés du matériau plus complexe.

Orientation des fibres

Les fibres étant introduites de manière aléatoire dans le thermoplastique, le filament à fondre est isotrope. C'est-à-dire qu'il présente des caractéristiques homogènes selon toutes les directions de l'espace. En effet, les fibres courtes sont orientées aléatoirement dans toutes les directions de l'espace (cf. Figure 4).

Toutefois, il convient de souligner que le procédé de fabrication influe fortement sur les caractéristiques du matériau. En ce qui concerne la fabrication additive par dépôt de fil fondu, la trajectoire de la buse d'impression a un rôle prépondérant (cf. Figure 6). En effet, lors de la fonte du thermoplastique les fibres vont s'aligner selon la direction d'impression du fait des forces de cisaillement. Cela rend les caractéristiques du matériau hétérogènes selon les directions de l'espace (anisotropie). Une augmentation de la résistance et de la rigidité du composite dans l'axe d'écoulement est observée. La raideur selon la direction d'impression est supérieure de l'ordre de 20 % à celle orthogonale à la direction d'écoulement [10].

Notons ici que la géométrie de la pièce dicte la trajectoire d'impression et donc l'orientation des renforts. Ainsi, l'anisotropie de la pièce est donc difficile à contrôler. L'accroissement des caractéristiques mécaniques est difficilement orientable selon la direction de l'effort, l'anisotropie des SFRP est un inconvénient.

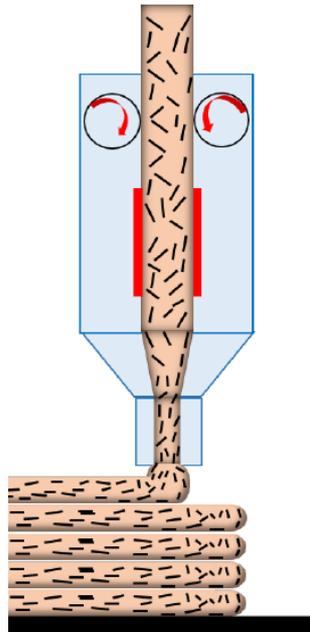


Figure 6 : Schéma explicatif de l'orientation des fibres lors de l'impression 3D [11]

D'autres mécanismes, tel que le refroidissement inégal dans l'épaisseur du fil, influent également sur l'orientation des fibres et donc l'anisotropie de la pièce [10].

Arrachement des fibres

L'introduction de fibres dans la matrice polymère améliore la rigidité et la résistance du matériau, toutefois la résistance globale est remise en question en raison de l'arrachement des fibres. Ce mécanisme représente le principal mécanisme de défaillance du composite.

En effet, les interfaces entre les fibres et la matrice représentent des discontinuités au sein du matériau [11]. Cela génère des concentrations de contrainte dans la pièce finale. De plus, le procédé de fabrication étant imparfait, des vides peuvent être observés au niveau de ces interfaces, ce qui aggrave le phénomène.

Ces imperfections sont donc des lieux préférentiels pour l'initiation de fissure qui détériorent les caractéristiques mécaniques du matériau [12]. L'interface fibre-matrice s'endommage et l'arrachement des fibres est observé (cf. Figure 7). La matrice et les fibres qui adhèrent encore ne peuvent plus résister à la contrainte imposée, ce qui conduit à leur rupture et donc à celle du composite.

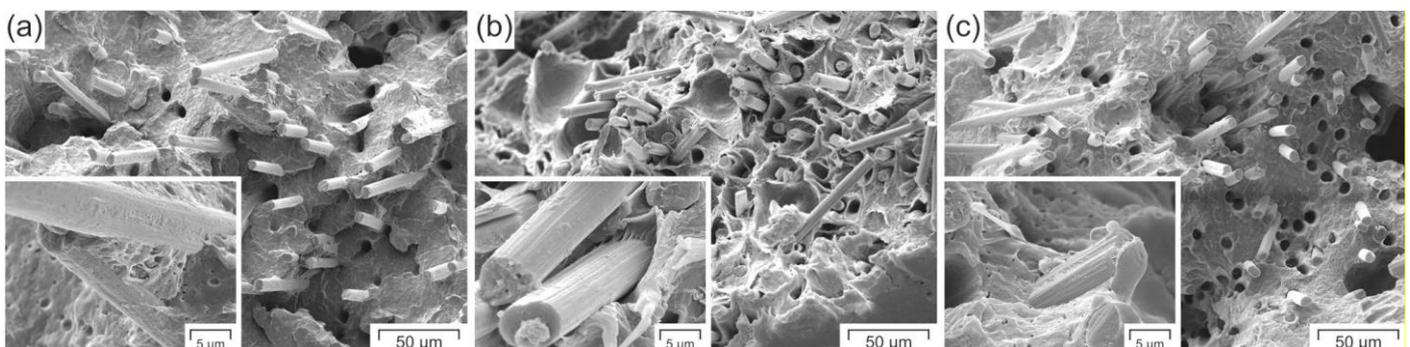


Figure 7 : Images en microscopie électronique à balayage de la surface de rupture des composites imprimés (a) PP/CF.10², (b) PP/CF.15 et (c) PP/CF.20 [13]

² PP/CF.xx : SFRP à matrice polypropylène et une fraction volumique de fibre de carbone courte de xx%

Une multitude de paramètre

Le procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu offre une grande liberté de conception. De nombreux paramètres sont modulables et tous influent sur les caractéristiques finales du composite.

Tout d'abord, tout comme pour l'impression des thermoplastiques classiques, les paramètres d'impression influent sur la qualité de la pièce et ses propriétés mécaniques (cf. Figure 8). La vitesse d'impression, le motif, la température de la buse et du plateau sont quelques exemples des variables à définir.

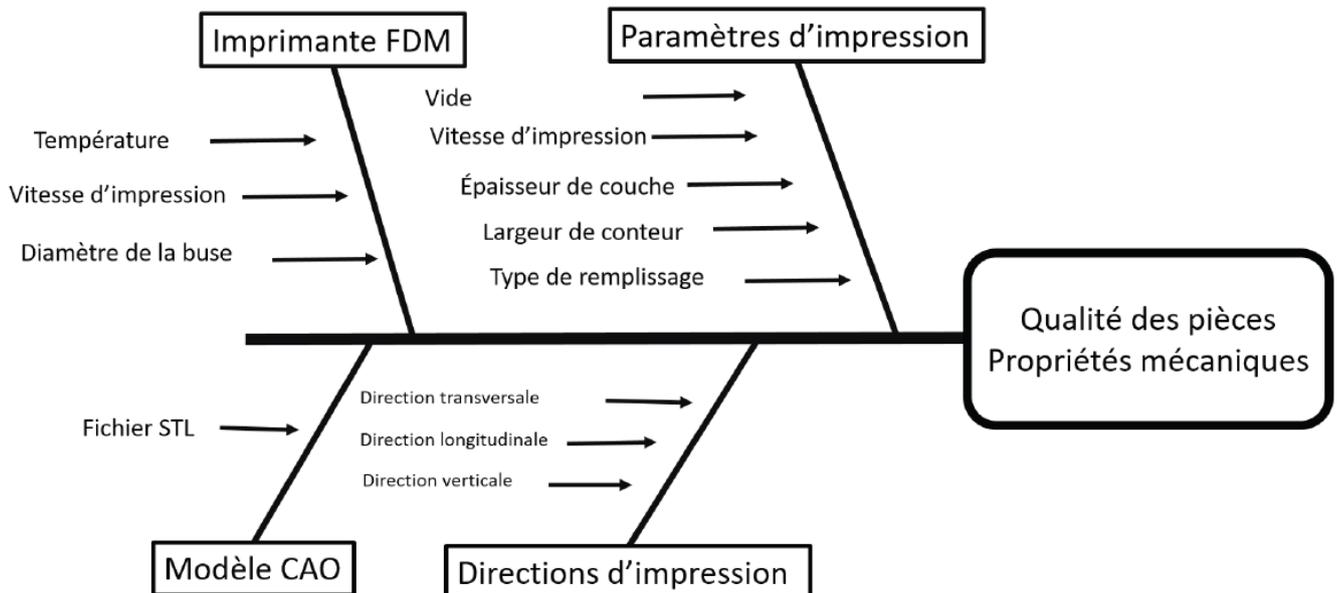


Figure 8 : Diagramme cause-effet des paramètres d'impression [11]

De plus, avec l'introduction de fibres dans le polymère, le nombre de paramètre matériau augmente. En effet, la longueur, le diamètre, le pourcentage de masse de fibre dans la matrice affectent les caractéristiques du composite. Par exemple, des études ont montré l'existence d'une teneur en fibre optimale pour la résistance à la traction et le module d'élasticité des composites polymères renforcés de fibres courtes [14].

1.4 - En résumé : SFRP

Les polymères renforcés de fibres courtes SFRP sont similaires aux polymères classiques aussi bien en termes de topologie, de fabrication et de propriété mécanique.

En effet, la maîtrise de l'insertion des fibres dans le polymère étant complexe, les fibres travaillent peu et la raideur du matériau est faiblement améliorée. Le module d'Young E des SFRP est de l'ordre de quelques GPa [15] [16]. La masse volumique est d'environ 1200 kg/m^3 . Nous retrouvons les caractéristiques mécaniques des polymères classique ($E_{PLA} \approx 3 \text{ GPa}$).

Ainsi, comme présenté en introduction, les SFRP sont classés dans la carte d'Ashby (cf. Figure 1) parmi les polymères. Leur domaine d'application est donc restreint au prototypage.

2 - Polymère renforcé de fibres longues (CFRP)

Afin d'obtenir des caractéristiques mécaniques comparables à celles des matériaux traditionnels (acier, aluminium, ...), une autre solution est d'insérer des fibres longues orientées dans la matrice thermoplastique. Ici, cette technique est comparable à celle du béton armé (cf. Figure 9 a). Le composite formé présente alors à la fois une bonne résistance à la compression grâce au béton et une bonne résistance à la traction grâce aux barres d'acier. Ainsi, l'introduction de fibres longues renforce la matrice dans la direction de celles-ci.

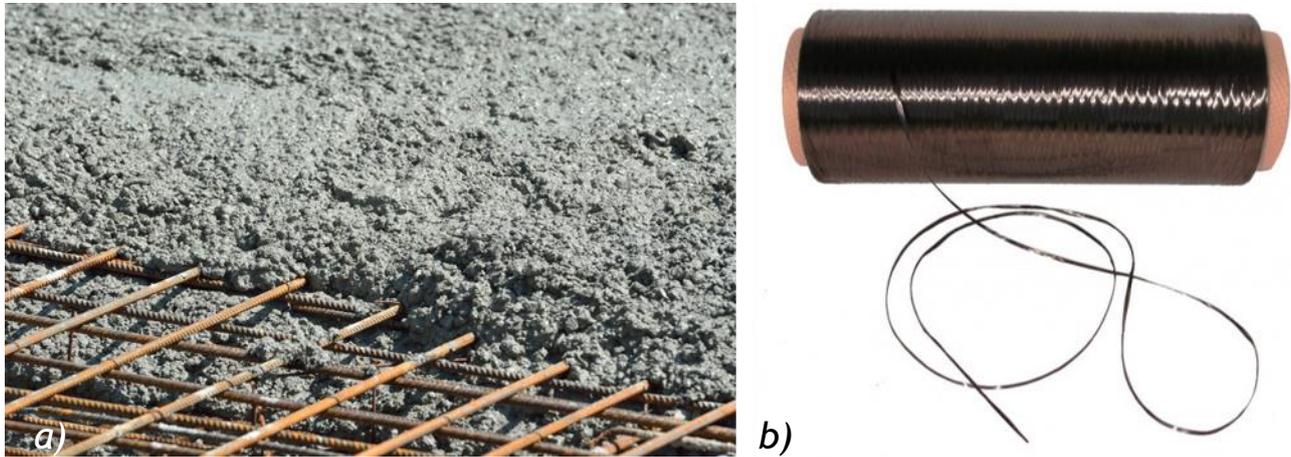


Figure 9 : a) Béton armé [17] ; b) Fil de carbone [18]

2.1 - Le matériau

De même que pour les polymères renforcés de fibres courtes, ceux avec des fibres longues sont composés d'une matrice thermoplastique classique et de fils, composés de plusieurs fibres. Le diamètre des renforts est toujours de quelques micromètres et leur longueur est presque infinie (cf. Figure 9 b).

Deux types de bobines sont actuellement disponibles sur le marché. Premièrement, il est possible d'acheter séparément les enroulements de polymère et de filament de fibres. La seconde option est une bobine dont le fil de fibre est déjà incorporé dans une résine thermodurcissable (cf. Figure 10). Celle-ci vient alors remplacer la bobine de fibre.

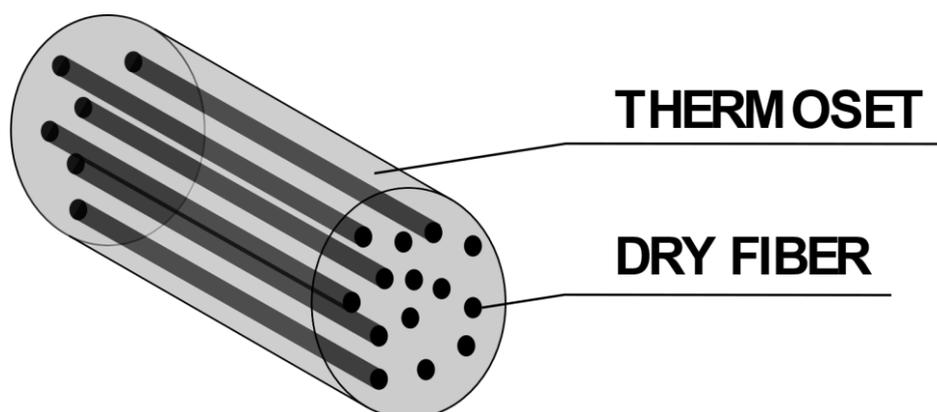


Figure 10 : Schéma d'un filament de polymère intégrant de la fibre de carbone longue

2.2 - La fabrication

Aujourd'hui, deux procédés sont en compétition pour l'impression des CFRP. Elles diffèrent en raison de leurs technologies d'imprégnation de la fibre dans la matrice polymère.

La co-extrusion, présentée en 2016 par Matsuzaki [19], propose une imprégnation dans la buse (cf. Figure 11 a). Le principe repose sur l'approvisionnement séparé de la fibre et du polymère. Lorsque que le filament de fibre, arrive dans la buse d'impression, il s'associe avec la résine fondue. Ainsi, une unique buse est utilisée pour l'impression du composite.

La double extrusion, développée par MarkForged [15] et proposée sur le marché en 2014 avec l'imprimante MarkOne, repose sur l'utilisation de deux buses d'impression (cf. Figure 11 b). La première dépose tout d'abord le polymère, par la suite la seconde vient incorporer le fil de fibres dans le polymère [20].

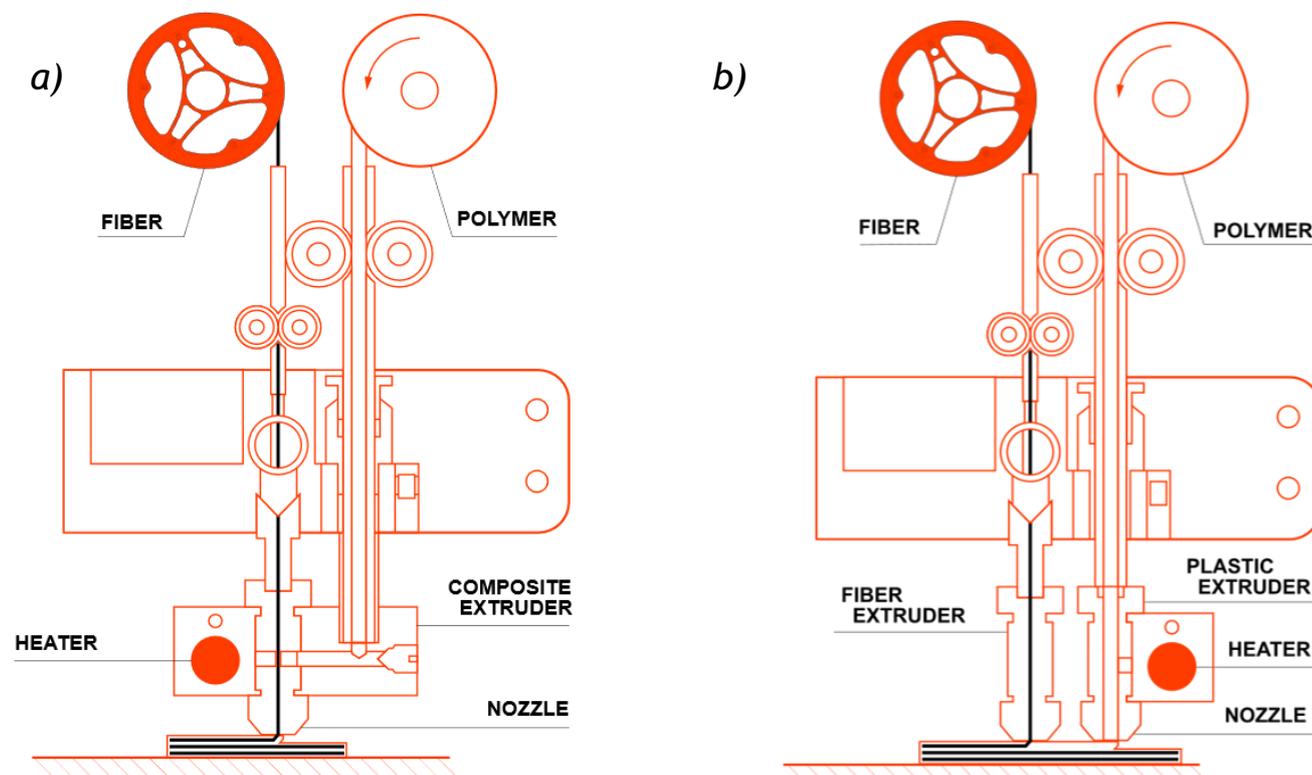


Figure 11 : Schéma du principe de a) co-extrusion [5] et de b) double extrusion

2.3 - Problématiques et bénéfices liés aux CFRP

Contrôle de l'orientation des fibres

L'utilisation de fibres longues orientées introduit, tout comme dans le cas des SFRP, de l'anisotropie de la pièce finale. En effet, quel que soit le procédé de fabrication [5] [15], les fibres sont introduites dans la direction d'impression (cf. Figure 12). Or, les renforts ayant des caractéristiques mécaniques, dans le sens de la fibre, bien supérieures à celles de la matrice polymère, ce sont eux qui dictent les propriétés du composite, notamment dans la direction parallèle de l'axe des fibres.

En effet, pour un filament de fibres seul, du fait de son caractère élancé, son comportement est comparable à celui d'une corde. Lorsque l'on tire sur une corde l'ensemble de la contrainte est reprise par celle-ci. En revanche, dans le cas où l'on pousse la corde, celle-ci vient se courber et elle ne supporte pas l'effort. Ainsi, une fibre seule travaille correctement qu'en traction.

Une fois entourée de résine thermoplastique, le filament de fibre ne peut pas se courber. Il devient alors capable de travailler en compression. Dans les directions autres que celle de l'axe des fibres, les propriétés de ces dernières étant nettement plus faibles, c'est la matrice qui supporte principalement les efforts. Ainsi, les propriétés transverses d'un CFRP renforcé unidirectionnellement sont essentiellement déterminées par la matrice thermoplastique.

Les propriétés des CFRP sont donc fortement anisotropes, celle-ci est comparable à celle obtenue pour un pli de composite stratifié [21]. De plus, celle-ci est partiellement contrôlable en FDM par le motif d'impression. Afin d'obtenir des propriétés mécaniques correctes selon différentes directions de l'espace, il est alors nécessaire, comme pour les composites stratifiés de jouer sur l'orientation des fibres.

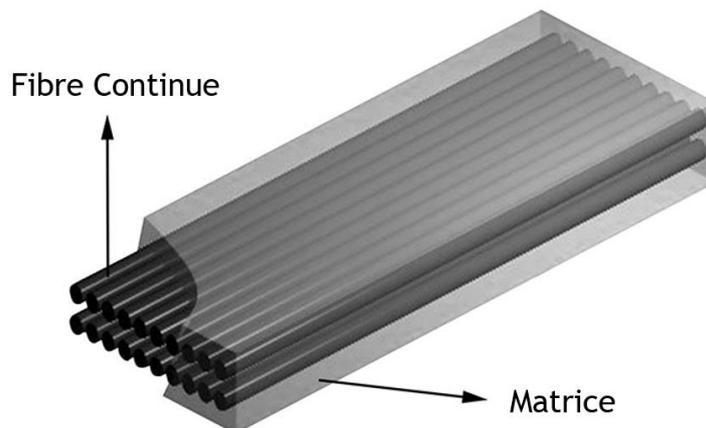


Figure 12 : Composite polymère renforcé unidirectionnellement de fibres longues [22]

L'imprégnation des fibres dans la matrice

L'interface fibre-matrice est un élément fondamental pour obtenir des propriétés mécaniques performantes. En effet, la contrainte imposée au matériau transite par la liaison des composants. L'imprégnation des fibres dans la matrice polymère doit donc être de qualité.

La double extrusion de MarkForged [15] veut répondre à cette problématique par l'imprégnation en profondeur des fils de fibres. Ceux-ci sont insérés dans le polymère qui vient refroidir et durcir autour du renfort. Cependant, l'utilisation d'une seconde buse rend le procédé plus complexe et limite les géométries imprimables [20]. De plus, les études montrent une répartition inégale de la matrice polymère à grande échelle [23] (cf. Figure 13).

La solution proposée par le fabricant Anisoprint [5] pour la co-extrusion réside dans la pré-imprégnation des fibres. En effet, les filaments de fibres sèches sont préliminairement intégrés dans le polymère. Le résultat, après séchage, est un renfort avec une porosité réduite. La Figure 14 met en évidence la présence de polymère autour des filaments de carbone composant le filament de fibre (gros cercle noir). Il y a donc, en plus de l'imprégnation en profondeur du fil tressé, celle des fibres. L'adhésion de celles-ci dans la matrice est alors améliorée.

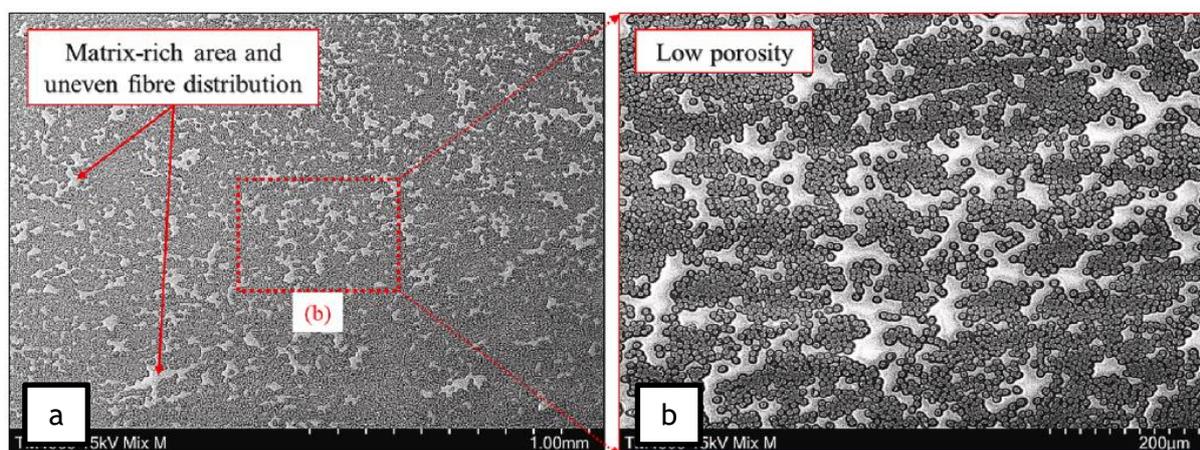


Figure 13 : Observation au microscope optique d'une section transversale d'un échantillon de CFRP Markforged avec matrice Polyamide et renforts en carbone [23]

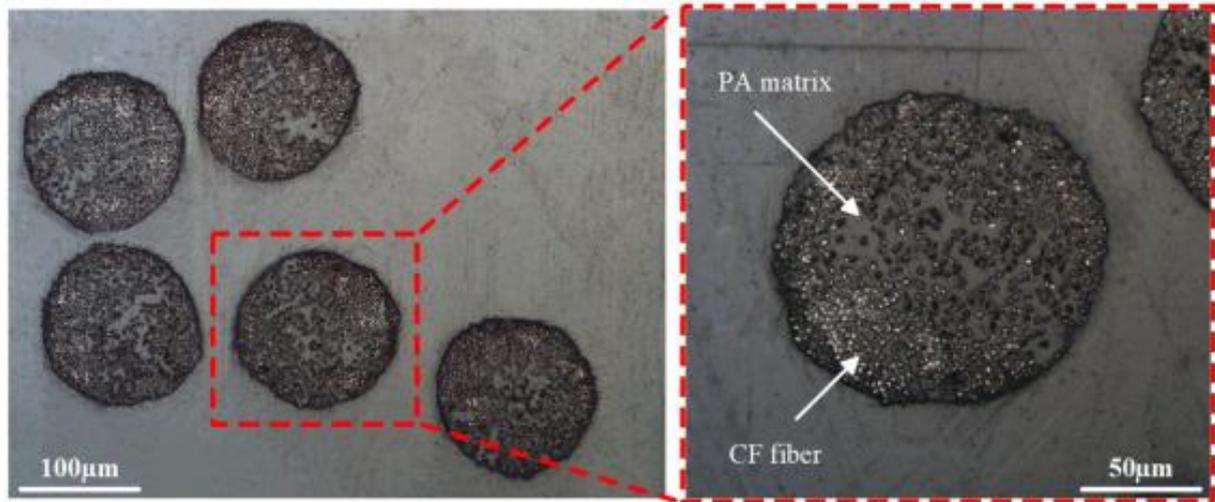


Figure 14 : Observation au microscope optique d'une section transverse d'un filament de carbone préimprégné Anisoprint (CF. : Fibre de carbone ; PA : Polyamide) [24]

2.4 - En résumé : CFRP

Les polymères renforcés de fibres longues, du fait de leur arrangement fibreux sont comparables aux composites stratifiés traditionnels.

La fabrication additive challenge les industriels au sujet de l'imprégnation des fibres dans la matrice. Toutefois, les solutions proposées aujourd'hui permettent de voir cette problématique s'effacer. Les renforts permettent d'améliorer significativement les caractéristiques mécaniques du polymère. La raideur du matériau est de l'ordre de 50 *GPa* et la masse volumique est de 1210 *kg/m³* pour une fraction volumique de fibre de 20%.

La carte d'Ashby place alors les CFRP dans la catégorie des composites. Ceux-ci sont donc aptes pour des applications structurales. L'étude plus approfondie du comportement mécanique des CFRP est donc nécessaire.

3 - Le CFRP : un comportement complexe

Les CFRP étant destiné à des applications structurales, de nombreuses recherches sont en cours afin de comprendre leur comportement complexe. La réponse sous sollicitations quasi-statiques ou répétées ainsi que les mécanismes de ruptures sont issus d'une multitude de phénomène. Cette section a pour vocation de mettre à jour, de manière simplifiée, les phénomènes mis en jeu dans les CFRP obtenus par FDM.

3.1 - Une rigidité directionnelle

Dans les sections précédentes nous avons mis en avant l'anisotropie des composites renforcés. Si l'on prend l'exemple d'un polymère renforcé unidirectionnellement de fibres longues, les propriétés mécaniques de celui-ci vont être bien plus élevées dans le sens des fibres (cf. Section 2.3).

Le module d'Young *E* ou module d'élasticité longitudinal quantifie la rigidité d'un matériau pour une contrainte uniaxiale (cf. Figure 15). La loi de Hooke dans la zone élastique donne un lien linéaire entre la contrainte σ et la déformation ε .

$$\sigma = E \varepsilon$$

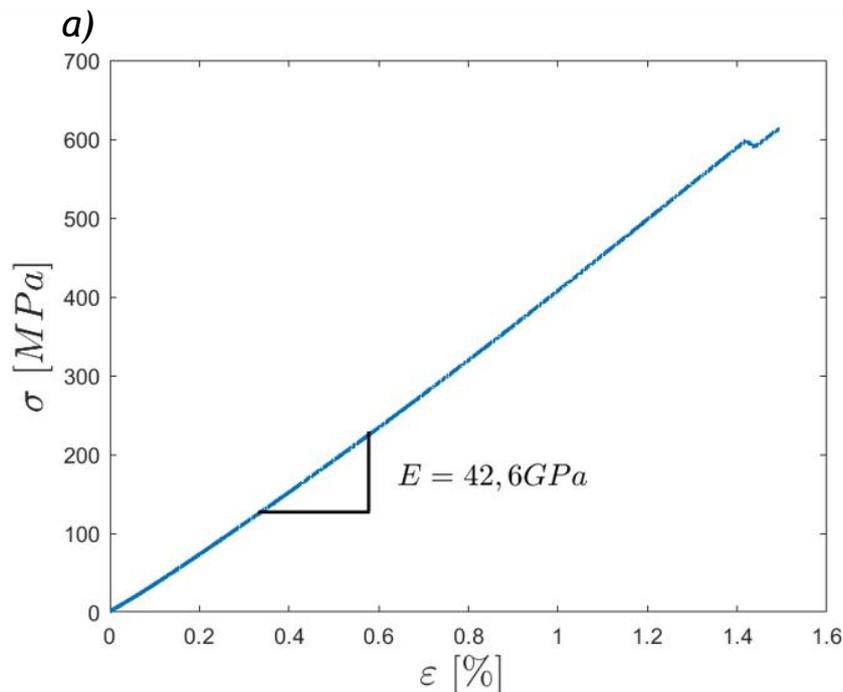


Figure 15 : a) Résultat d'un essai de traction sur un composite polymère renforcé unidirectionnellement par des fibres de carbone longues et b) photo du dispositif expérimental

Ainsi, cette rigidité n'a de sens que pour une direction précise du matériau. Dans les autres directions de l'espace, du fait de l'arrangement spatial différent des fibres, la rigidité sera différente.

Le module d'Young indiqué dans la carte d'Ashby (cf. Figure 16), présentée en introduction, est celui dans la direction des fibres. Dans le cas d'un composite carbone-époxy stratifié (CFRP) la raideur moyenne lue est de 150 GPa . Pour ce type de matériau le module d'Young perpendiculaire au sens des fibres est d'environ 10 GPa . Il s'agit de la valeur de la matrice. La notion d'anisotropie est illustrée ici avec un rapport de 15 pour la raideur d'un composite carbone-époxy stratifié. Il est donc primordial de tenir compte de l'anisotropie des matériaux pour la lecture de la carte d'Ashby (cf. Figure 16).

La carte d'Ashby (cf. Figure 16) permet, de plus, la comparaison des propriétés des composites stratifiés (polymère renforcé de fibres de carbone ou de verre) avec ceux imprimés. Les CFRP obtenus par FDM ont un module d'élasticité légèrement inférieur aux stratifiés traditionnels. Celui-ci est d'environ 45 GPa [25] [26] pour un renfort en carbone alors qu'il est situé entre 100 et 200 GPa (cf. Figure 16) pour des stratifiés carbone-époxy. La différence de rigidité peut s'expliquer premièrement par la difficulté de maîtriser l'interface fibre - matrice par fabrication additive. De plus, la proportion de fibre dans le composite est un élément déterminant dans les caractéristiques mécanique. Pour l'échantillon de CFRP obtenu par FDM avec un module d'Young de 45 GPa , la fraction volumique de fibre de carbone est de 20%. Celle-ci est située entre 50% et 60% pour les stratifiés carbone-époxy. Cette variation de proportion de fibre dans le composite explique aussi la différence de masse volumique entre les deux matériaux. Elle est d'environ 1210 kg/m^3 pour un CFRP FDM tandis qu'elle est proche de 1500 kg/m^3 pour les stratifiés carbone-époxy.

L'utilisation de fibres longues en carbone permet donc d'obtenir une rigidité proche de celle des matériaux traditionnels tel que l'aluminium. Cependant, sa masse volumique est bien plus faible.

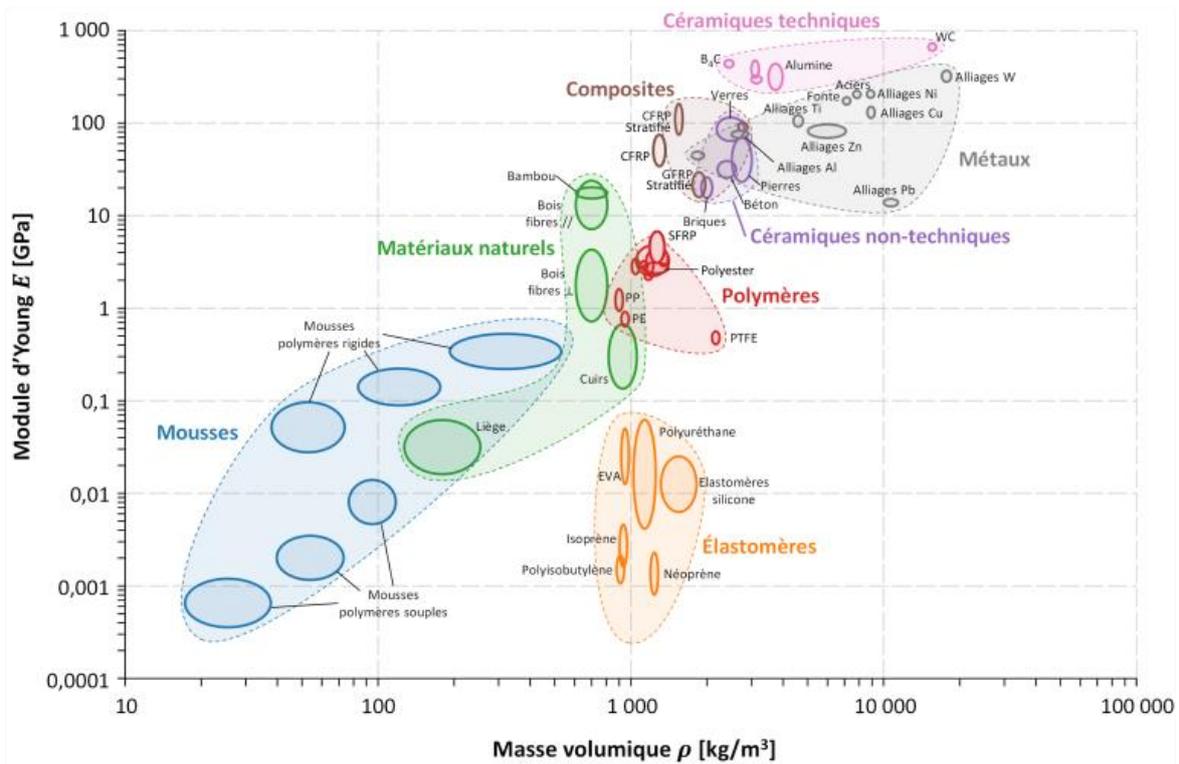


Figure 16 : Diagramme d'Ashby [6]

3.2 - Des mécanismes de ruptures non conventionnels

Dans la grande majorité des essais de caractérisation, le matériau est testé jusqu'à sa rupture. L'analyse du mécanisme de fissuration est essentielle afin de comprendre les phénomènes régissant la fin de l'essai.

Les matériaux avancés tels que les composites polymères renforcés de fibres longues obtenus par FDM produisent des modes de ruptures complexes. En effet, les interfaces d'un matériau multi-composant ont un rôle majeur dans le processus de rupture.

Pour les polymères renforcés obtenus par FDM, soumis à une traction selon le sens des fibres, un mécanisme de rupture est prépondérant devant les autres. Il s'agit de la propagation de défaut le long des fibres, cela endommage l'interface matrice - fibre et mène à la rupture de la matrice. Ces imperfections, à la source de la fissuration du matériau, sont des vides entre le polymère et les fibres du fait de la difficulté d'imprégnation des fibres dans le procédé de fabrication. Une fois arrivé au niveau des mors, le défaut ne peut plus se propager longitudinalement, la rupture des fibres est alors observée. La rupture longitudinale au milieu de la zone de mesure est observable en Figure 17 a pour un composite polymère renforcé de fibres de carbone longues.

D'autres types de rupture sont observés pour ces composites. La Figure 17 b présente une rupture horizontale au niveau de la fin des mors de la machine de traction. La localisation de cette cassure indique une influence de la discontinuité de contrainte due à la fin des mors. La variation brusque de géométrie augmente la contrainte dans l'éprouvette. Ce type de rupture n'est donc pas convenable pour caractériser le composite. Afin de réduire leur fréquence d'apparition, il est nécessaire d'utiliser des plaques placées entre les mors et le matériau à tester. Ces languettes d'extrémités jouent un rôle de coussin. Premièrement, elles protègent les surfaces de l'échantillon de l'action des mors. Deuxièmement, par l'augmentation de l'épaisseur des extrémités des éprouvettes, elles réduisent les concentrations de contraintes au niveau des mors. La discontinuité de contrainte est donc atténuée. Des languettes d'extrémité sont visualisables sur les Figure 17 a) et b).



Figure 17 : a) Exemple de rupture longitudinale au milieu de la zone de mesure et b) horizontale au niveau de la fin des mors pour un CFRP avec des renforts en fibres de carbone

3.3 - Comportement en fatigue

En raison de l'organisation interne des composites polymères renforcés de fibres longues, leur réponse en fatigue est complexe. Afin de mesurer la durée de vie et l'évolution des caractéristiques d'un matériau au cours de son utilisation, des essais de fatigue sont menés. Il s'agit de sollicitations en traction ou flexion répétées afin de simuler la charge et la décharge d'un matériau lors de son fonctionnement dans un système.

Dans cette partie, le cas d'essais de fatigue en traction est abordé. Le graphe Figure 18 représente le comportement d'un matériau quelconque soumis à ce type de sollicitation. Un cycle est composé d'une mise en contrainte (B -> A) puis d'une décharge (A -> B). La zone entre la charge et la décharge (en bleu sur la Figure 18), appelée aire d'hystérésis, correspond à la quantité d'énergie dissipée par le matériau lors d'un cycle. Afin d'obtenir une évaluation de la rigidité, on définit le module d'Young dynamique. Celui-ci correspond à la pente du cycle d'hystérésis (ligne en pointillés sur la Figure 18).

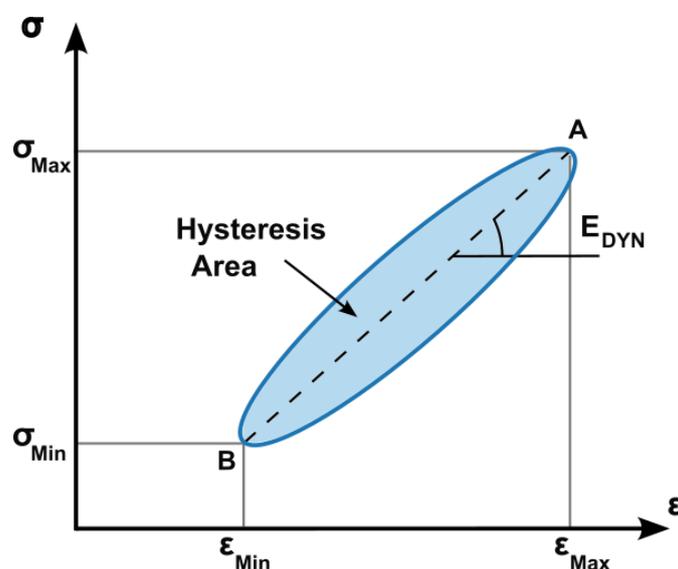


Figure 18 : Représentation schématique de la réponse contrainte-déformation d'un polymère à un chargement cyclique (rapport de charge positif)

La coexistence de la matrice et des fibres est à la source de deux types de réponse du CFRP. Ces deux mécanismes, décrits ci-dessous, opèrent simultanément lors de l'essai de fatigue.

Le premier type de comportement est mécanique. C'est celui observé pour les matériaux standards tel que l'acier. Un défaut, initialement présent à cause du procédé de fabrication, se propage progressivement sous l'action des sollicitations répétées.

Le second type de réponse en fatigue est thermique. Le caractère visco-élastique du polymère libère à chaque sollicitation mécanique de la chaleur. Le plastique a une grande capacité de déformation, son étirement soulage les contraintes internes dans le matériau qui relâchent de l'énergie à l'extérieur sous forme de chaleur. On parle de chauffage hystérétique. Il s'agit de la zone bleue sur la Figure 18. Tout comme la masse, l'énergie doit se conserver, l'énergie mécanique est transformée en énergie thermique : « *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* »³.

Comme évoqué précédemment, le comportement des composites CFRP obtenus par FDM est principalement dicté par les fibres en raison de leurs propriétés mécaniques élevées. Ainsi, pour un CFRP renforcé unidirectionnellement, lorsque la charge est dirigée le long des fibres, celles-ci vont reprendre la contrainte et le mécanisme conventionnel de rupture est observé. Un défaut présent à l'interface entre la matrice polymère et la fibre se propage le long de la fibre. Cela endommage la matrice qui ne pourra plus transmettre les efforts vers la fibre. Les fibres encore imprégnées dans la matrice vont alors voir un surplus de contrainte jusqu'à ne plus pouvoir le supporter et donc rompre. La matrice ne peut résister à la contrainte imposée et par conséquent le composite se brise [27] [28].

Toutefois, dans le cas d'un CFRP où les fibres sont à $\pm 45^\circ$ de direction d'effort, c'est la matrice thermoplastique qui encaisse la contrainte. Une réponse thermique importante est observée. Deux cas se présentent alors [16]. En premier lieu, si la fréquence de sollicitation est faible, la chaleur a le temps de se dissiper et la température se stabilise. La réponse mécanique est alors observée. Un défaut de porosité à l'interface entre la matrice et la fibre va mener à une rupture conventionnelle. En second lieu, si la fréquence de sollicitation est élevée, la chaleur n'a pas le temps de se dissiper et la température augmente. L'aire d'hystérésis s'agrandit alors. La matrice étant en thermoplastique, celle-ci se ramollie et la rigidité diminue. Le module d'Young dynamique décroît. Ce mécanisme s'amplifie à chaque sollicitation jusqu'à rupture du polymère par échauffement. En effet, celui-ci n'est plus en capacité de résister à la contrainte imposée en raison de l'affaissement de ses propriétés mécaniques.

4 - Conclusion

Les composites polymères renforcés de fibres courtes (SFRP) ou longues (CFRP) obtenus par fabrication additive représentent des matériaux intéressants en raison de leur facilité de production. L'objectif de renforcer les propriétés des thermoplastiques est réussi. Toutefois, pour le polymère renforcé de fibres courtes, les caractéristiques mécaniques statiques restent faibles. Ces raisons limitent ce composite à la production de prototypes et de pièces de faible résistance. Les polymères renforcés de fibres longues ont des caractéristiques mécaniques proches des matériaux traditionnels (acier, aluminium, ...). Cependant, il existe un écart considérable entre les propriétés des composites fabriqués par FDM et leurs homologues stratifiés. Une explication possible est la difficulté d'imprégnation des fibres dans la matrice en impression 3D.

Ainsi, les chercheurs explorent des nouvelles voies dans la fabrication additive afin de réduire les défauts de fabrication dans le composite. De plus, des études à propos du comportement complexe des polymères renforcés sont en cours afin de comprendre au mieux les phénomènes régissant la réponse de ces matériaux. La maîtrise de ces concepts permettra l'intensification de la fabrication et donc de la commercialisation de pièces en composite renforcé de fibre.

³ Antoine Lavoisier (1743-1794), chimiste, philosophe et économiste français

5 - Glossaire

ABS	Acrylonitrile Butadiène Styène. Polymère thermoplastique
CFRP	Continuous Fiber Reinforced Polymer (Polymère renforcé de fibres continues / longues)
Composite	Matériau hétérogène formé d'au moins deux constituants non miscibles, disposés selon une organisation géométrique particulière
FDM	Fused Deposition Modeling (Dépôt de fil fondu). Procédé de fabrication additive consistant à déposer de la matière à l'état liquide couche par couche
PLA	Acide PolyLactique. Polymère biosourcé issu de la fermentation puis de la polymérisation d'amidon de maïs
Polymère	Substance composée de molécules caractérisées par la répétition, un grand nombre de fois, d'un ou de plusieurs atomes ou groupes d'atomes
SFRP	Short Fiber Reinforced Polymer (Polymère renforcé de fibres courtes)

Références

[1]: G. Nannan et L. Ming C., Additive manufacturing: technology, applications and research needs, *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, pp. 215-243, 2013

[2]: B. Angalde et D. Comberton, Impression 3D : présentation générale, CultureSciences de l'Ingénieur, 2018, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/impression-3d-presentation-generale

[3]: C. Ping , P. Yong, L. Shixian , R. Yanni, L. D. Antoine, W. Kui et A. Said, 3D printed continuous fiber reinforced composite lightweight structures: A review and outlook, *Composites Part B: Engineering*, vol. 250, p. 110450, 2023

[4]: L. Gendre, Les grandes familles de matériaux composites, CultureSciences de l'Ingénieur, 2011, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/les-grandes-familles-de-materiaux-composites

[5]: Anisoprint, <https://anisoprint.com/>

[6]: https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9lection_des_mat%C3%A9riaux

[7]: Fibres de verre coupées, <https://www.bricomag-media.com/beton-fibre/>

[8]: quai-west-composites, <https://boutique.quai-west-composites.fr/fibre-coupee/175-fibre-coupee.html>

[9]: Les matériaux composites renforcés utilisés dans l'impression 3D, https://www.atome3d.com/blogs/news/les-materiaux-composites-renforces-utilises-dans-limpression-3d?srsltid=AfmBOorZ01pRfx4_1wEr7Qz2kPhftlXk4bDUssApUxChvhvLEvP8XzHV

[10]: H. Miled, Modélisation de l'orientation de fibres induite par l'écoulement et comportement élastique anisotrope à l'état solide, CEMEF - Centre de Mise en Forme des Matériaux , 2010

[11]: M. Dihya, Étude expérimentale et modélisation du procédé d'impression en 3D de pièces en thermoplastiques chargés de fibres, IRDL - Institut de Recherche Dupuy de Lôme , 2020

[12]: K. Noda , A. Takahara et T. Kajiyama , Fatigue failure mechanisms of short glass-fiber reinforced nylon 66 based on nonlinear dynamic viscoelastic measurement, *Polymer*, vol. 42, pp. 5803-5811, 2001

- [13]: M. Spoerk , C. Savandaiah , F. Arbeiter, G. Traxler , Ludwig Cardon , C. Holzer et J. Sapkota, Anisotropic properties of oriented short carbon fibre filled polypropylene parts fabricated by extrusion-based additive manufacturing, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 113, pp. 95-104, 2018
- [14]: A. Samia et I. Lazoglu, A review on additive manufacturing of carbon fiber-reinforced polymers: Current methods, materials, mechanical properties, applications and challenges, *Journal of applied polymer*, 2022
- [15]: Markforged, <https://markforged.com/>
- [16]: A. Panerai, A. Canegrati, L. Martulli, M. Kostovic, G. Rollo, A. Sorrentino, M. Carboni et A. Bernasconi, Fatigue Behaviour of Additively Manufactured Short Fibre Reinforced Polyamide, *International Journal of Fatigue*, vol. 174, p. 107711, 2023
- [17]: Ouvrage en béton armé, <https://tem-btp.com/services/ouvrage-en-beton-arme/>
- [18]: Fil de carbone, <https://www.mack-kayak.com/rubans-ud-fils-et-tresses/1274-fil-carbone.html>
- [19]: R. Matsuzaki, M. Ueda, M. Namiki, T. K. Jeong, H. Asahara, K. Horiguchi, T. Nakamura, A. Todoroki et Y. Hirano, Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation, *Scientific Reports*, 2016
- [20]: Z. Hongyuan, L. Xiaodong, Z. Wei, W. Gong et L. Bingshan, An Overview of Research on FDM 3D Printing Process of Continuous Fiber Reinforced Composites, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1213, p. 052037, 2019
- [21]: L. Gendre, Matériaux composites et structures composites, CultureSciences de l'Ingénieur, 2011, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/materiaux-composites-et-structures-composites
- [22]: Composites thermoplastiques renforcés de fibres continues, <https://fr.topolocf.rt.com/composites-thermoplastiques-renforces-de-fibres-continues/>
- [23]: S. W. K. Z. J. W. A. L. J. L. D. Y. Haoqi Zhang, 3D printing of continuous carbon fibre reinforced polymer composites with optimised structural topology and fibre orientation, *Composite Structures*, vol. 313, p. 116914, 2023
- [24]: M. Zhang, Z. Sun, Y. Liang et I. Alexandrov, Preparation of continuous carbon fiber reinforced PA6 prepreg filaments with high fiber volume fraction, *Additive Manufacturing Letters*, vol. 11, p. 100245, 2024
- [25]: N. Marco, Specimen design for static characterisation of 3D printed unidirectional continuous fibre reinforced polymer using Fused Filament Fabrication, Politecnico di Milano, 2023
- [26]: A. Pertuz, S. Díaz-Cardona et O. A. González-Estrada, Static and fatigue behaviour of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique, *International Journal of Fatigue*, vol. 130, p. 105275, 2020
- [27]: A. Pujol, Analyse expérimentale du comportement en fatigue d'un polymère renforcé de fibres continues obtenu par fabrication additive, ENS Paris-Saclay, 2024
- [28]: S. M. Fijul Kabir, K. Mathur et A.-F. M. Seyam , A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties, *Composite Structures*, vol. 232, n° 1111476, 2020
- [29]: Experimenting with making continuous carbon fiber-core filament, https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/1hkduff/experimenting_with_making_continuos_carbon/?show=original
- Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>