



HAL
open science

Economie circulaire pour les composites à fibres de carbone : du déchet aéronautique vers les composites carbone+ thermoplastiques recyclés

Yang Shi

► **To cite this version:**

Yang Shi. Economie circulaire pour les composites à fibres de carbone : du déchet aéronautique vers les composites carbone+ thermoplastiques recyclés. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2022. Français. NNT : 2022BORD0153 . tel-03772537

HAL Id: tel-03772537

<https://theses.hal.science/tel-03772537>

Submitted on 8 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR
SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE

Yang SHI

**Économie circulaire pour les composites à fibres de
carbone: du déchet aéronautique vers les composites
carbone + thermoplastiques recyclés**

Sous la direction de : **Éric LACOSTE**
(Co-encadrants : **Olivier MANTAUX** et **Arnaud GILLET**)

Soutenue le 21 avril 2022

Membres du jury :

M. OUAGNE Pierre	Professeur, ENIT-Tarbes	Rapporteur
M. PERRIN Didier	Professeur, Centre des Matériaux des Mines d'Alès	Rapporteur
M. BERTHET Florentin	Chargé de Recherche, École des Mines d'Albi-Carmaux	Examinateur
M. SOLLOGOUB Cyrille	Professeur, Conservatoire National des Arts et Métiers	Examinateur
M. LACOSTE Éric	Professeur, Université de Bordeaux	Examinateur
M. MANTAUX Olivier	Maître de Conférences, Université de Bordeaux	Examinateur
M. GILLET Arnaud	Maître de Conférences, Université de Bordeaux	Examinateur

Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué au laboratoire I2M (Institut de Mécanique et d'ingénierie) de Bordeaux (CNRS 5295) en collaboration avec le laboratoire PIMM (Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux) de Paris. Le financement a été assuré par l'ADEME (Agence de la transition écologique) avec un co-financement de l'Institut Carnot-Arts. Je tiens à remercier ceux qui ont contribué à la mise en place de cette collaboration.

Je tiens ensuite à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer mes travaux et en particulier à M. OUAGNE Pierre et M. PERRIN Didier pour avoir accepté la tâche d'être rapporteurs de ce travail de recherche ;

Merci à mes encadrants, Éric LACOSTE, Olivier MANTAUX, Arnaud GILLET pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me recrutant, mais également pour le temps qu'ils ont consacré à mon encadrement.

Je n'oublie pas mes collègues doctorants et ingénieurs de l'I2M, Alexandre, Abir, Constance, Diego, Paul, Tanguy et tous les autres avec qui j'ai partagé de bons moments en salle de pause. Merci beaucoup à Cyrille qui m'a si bien accueilli à Paris. Merci beaucoup aux techniciens de l'I2M Jean-Marc, Matthieu et Nicolas pour leur disponibilité et leur soutien technique pendant les manipulations.

Enfin, je tiens à remercier ma femme Min LIANG pour sa patience et son amour inconditionnel. Aux nombreuses personnes que je n'ai pas nommées, merci beaucoup !

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
1. Contexte : particularités/intérêt des matériaux composites à fibres de carbone recyclées.....	1
2. Positionnement des composites à fibres recyclées réalignées par rapport à l'état de l'art	1
3. Objectifs des travaux réalisés à l'I2M et au PIMM sur le recyclage des fibres de carbone	5
4. Fibres de carbone utilisées dans le cadre de cette thèse	6
Chapitre 1 : Etude du transfert de charge entre fibres dans les matériaux composites à fibres de carbone discontinues.....	8
1. Introduction : modélisation de différents recouvrements de fibres discontinues.....	9
2. Simulation numérique de la résistance d'un joint à simple recouvrement	9
2.1 Solution analytique de Yuan	9
2.1.1 Domaine modélisé.....	9
2.1.2 Traitement de l'interface entre 2 fibres	10
2.1.3 Adaptation de la solution analytique de Yuan.....	10
2.2 Modèle numérique du comportement d'un joint à simple recouvrement avec les conditions aux limites « de Yuan ».....	14
2.2.1 Modèle numérique.....	14
2.2.2 Influence du maillage	16
2.2.3 Simulations numériques	16
2.2.4 Etude du cisaillement le long de l'interface (Lr=40mm).....	18
2.3 Comparaison des résultats du modèle ABAQUS/ solution analytique de Yuan...19	
2.4 Influence des paramètres de la contrainte de cisaillement à rupture de l'interface (τ_f) et de l'énergie à rupture (G_{IIC})	20
3. Modélisation d'un joint à double recouvrement et comparaison avec des essais expérimentaux pour la détermination de τ_f et G_{IIC}	21
3.1 Essais expérimentaux sur éprouvette avec joint à double recouvrement (référence 6P6C)	21
3.1.1 Mise en œuvre de plaques composites avec joint à double recouvrement ...21	
3.1.2 Mesure des longueurs de recouvrement	22
3.1.3 Calcul de la contrainte à rupture en traction du joint à double recouvrement et résultats des essais de traction	23

3.1.4 Détermination de la contrainte à rupture de l'interface (τ_f) et de l'énergie de rupture (G_{IIC}).....	25
3.2 Simulation numérique du joint à double recouvrement	26
3.2.1 Géométrie du domaine.....	26
3.2.2 Modèle numérique.....	27
3.2.3 Simulations numériques	28
3.2.4 Etude du cisaillement le long de l'interface.....	29
3.3 Comparaison des résultats numériques et des essais expérimentaux sur le joint à double recouvrement	30
3.4 Etude de l'influence des paramètres sur la résistance du joint à double recouvrement.....	31
3.4.1 Influence de l'énergie de rupture (G_{IIC}).....	31
3.4.2 Influence de la contrainte de cisaillement maximale de l'interface (τ_f)	32
4. Modélisation de la résistance d'un joint à simple recouvrement.....	32
4.1 Simulation numérique du joint à simple recouvrement	32
4.1.1 Modèle numérique.....	32
4.1.2 Résultats des simulations numériques	33
4.2 Essais expérimentaux de simple recouvrement (essais réf 4P4C)	34
4.2.1 Mise en œuvre de plaques composites avec fibres de carbone discontinues	34
4.2.2 Calcul de la contrainte à rupture en traction supportée par un joint à simple recouvrement	35
5. Conclusions et récapitulatif du comportement mécanique d'un recouvrement partiel entre deux fibres	36
Chapitre 2 : Modélisation d'un composite avec différentes longueurs de recouvrement	38
1. Introduction : Mettre en évidence l'influence de l'architecture sur la rupture d'un composite à fibres recyclées.....	39
2. Modélisation de la résistance des joints en «escalier»	39
2.1 Simulation numérique des joints en «escalier».....	39
2.1.1 Modèle numérique.....	39
2.1.2 Détermination de la longueur de transfert de charge du modèle en «escalier»	40
2.1.3 Résultats des simulations numériques avec $L_r = 5\text{mm}$ ou $L_r = 25\text{mm}$	41
2.1.4 Etude de l'influence de grandes longueurs de recouvrements sur la résistance du composite avec $L_r = 5\text{mm}$ ou $L_r = 40\text{mm}$	44
2.2 Essais expérimentaux des joints en «escalier».....	45
2.3 Comparaison modèle ABAQUS de joints en «escalier» / essais expérimentaux	46

2.4 Etude paramétrique de la longueur de recouvrement sur la résistance du composite des joints en «escalier»	46
2.4.1 Influence d'une erreur sur une petite longueur de recouvrement en peau	47
2.4.2 Influence d'une erreur sur une grande longueur de recouvrement à l'intérieur	47
2.4.3 Influence d'une erreur sur une petite longueur de recouvrement à cœur.....	48
2.4.4 Influence des trois erreurs sur trois petites longueurs de recouvrement répartis symétriquement.....	48
2.4.5 Influence des deux erreurs sur deux grandes longueurs de recouvrement à cœur	49
2.4.6 Conclusions sur l'influence des erreurs sur les longueurs de recouvrement des joints en «escalier»	49
3. Modélisation de la résistance des joints en «emboîtement».....	49
3.1 Simulation numérique des joints en «emboîtement»	49
3.1.1 Modèle numérique.....	50
3.1.2 Résultats des simulations numériques	50
3.1.3 Conclusions sur le modèle numérique des joints en «emboîtement».....	52
4. Conclusions et récapitulatif du comportement mécanique du modèle avec les différentes longueurs de recouvrement	53
Chapitre 3 : Etude de l'énergie à rupture de l'interface (G_{IIC}) des différentes matrices thermoplastiques	56
1. Essai d'imprégnation des fibres de carbone par une matrice thermoplastique	57
1.1 Objectif	57
1.2 Etude de l'étanchéité du moule	59
1.3 Etude de l'imprégnation	61
1.4 Conclusion sur l'étude de l'imprégnation des fibres de carbone par la poudre de polyamide.....	62
2. Sélection des résines thermoplastiques	62
3. Détermination de l'énergie à rupture de l'interface (G_{IIC}) sur les différentes résines thermoplastiques	63
3.1 Mise en œuvre pour les différents composites du joint à double recouvrement (ref.6P6C).....	63
3.2 Problématique de la mise en œuvre du composite du joint à double recouvrement Fc/PC granulé	65
3.2.1 Réduction des granulés de PC en poudre	66
3.2.2 Fabrication des films avec les granulés de PC	66
3.3 Fabrication des plaques composite du joint à double recouvrement Fc/PC poudre et Fc/PC film (ref.6P6C avec $L_r=60\text{mm}$).....	67
3.4 Mesure des G_{IIC}	67

3.4.1 Méthode pour calculer la fraction volumique des fibres de carbone du composite	68
3.4.2 Calcul du G_{IIC} du PA6 et du PC	69
3.5 Comparaison de la résistance du composite FCr/PA6 film, FCr/PC film avec celle du Composite FCr/époxy.....	70
3.5.1 Préparation des plis du tissu de fibres de carbone recyclées alignées	70
3.5.2 Résistance des plaques de composite	71
3.5.3 Influence du désensimage sur la résistance du composite de référence FCr/époxy.....	72
3.6 Détermination de la longueur de transfert de charge (L_{TC}) du joint à double recouvrement (ref.6P6C) pour les composites Fc/PA6 film et Fc/PC film.....	72
4. Conclusion sur la mise en œuvre de matériaux composites FCr/matrice thermoplastique	73
Chapitre 4 : Performance environnementale des matériaux composites de 2ème génération à base de fibres de carbone recyclées	76
1. Introduction	77
2. Reconception d'un produit en intégrant des fibres de carbone recyclées	77
2.1 Contexte	77
2.2 Bases de la comparaison : pale d'éolienne portable.....	78
2.3 Efforts exercés par le vent sur une pale d'éolienne	78
2.4 Dimensionnement d'une pale d'éolienne en fonction du matériau	81
3. Scénarios de fabrication des pales d'éolienne portable.....	84
3.1 Hypothèses et pistes d'étude.....	84
3.1.1 Hypothèses	84
3.1.2 Pistes spécifiques à cette étude pour minimiser l'impact environnemental ..	85
3.2 Scénarios d'analyse environnementale	85
3.2.1 Unité fonctionnelle	85
3.2.2 Scénario 1 « pale alliage d'aluminium ».....	85
3.2.3 Scénario 2 « pale composite fibres de verre »	86
3.2.4 Scénario 3 « pale composite fibres de carbone recyclées et matrice therm durcissable »	87
3.2.5 Scénario 4 « pale composite fibres de carbone recyclées et matrice thermoplastique »	88
4. Données environnementales	90
4.1 Impact de la résine époxy	90
4.2 Impact du poly téréphtalate d'éthylène (PET)	91
4.3 Polycarbonate (PC).....	92
4.4 Polyamide (PA).....	93

4.5 Acide polylactique (PLA)	95
4.6 Comparaison des impacts environnementaux des différentes résines thermoplastiques	96
4.7 Fibres de verre	98
4.8 Fibres de carbone	99
4.9 Impact environnemental de la mise en œuvre d'un matériau composite	100
4.10 Impact environnemental pour la mise en œuvre d'un thermoplastique par thermoformage	101
4.11 Impact environnemental des différents procédés de traitement de déchets composites et de recyclage de fibres de carbone	101
4.12 Récapitulatif des impacts environnementaux des matériaux et des procédés	101
5. Evaluation des impacts environnementaux d'une pale d'éolienne en fonction du matériau choisi	104
5.1 Rappel de l'unité fonctionnelle et des hypothèses	104
5.2 Bilan énergétique	105
5.3 Modélisation des impacts environnementaux d'une pale d'éolienne	108
Conclusions et perspectives	113
Bibliographie	116

INTRODUCTION

1. Contexte : particularités/intérêt des matériaux composites à fibres de carbone recyclées

Depuis leur industrialisation, la production de composites en fibres de carbone augmente de façon continue. Lors du recyclage des composites à fibres de carbone, seules les fibres seront recyclées. Autrement dit, il faut tout d'abord « supprimer » la matrice. Ce processus se fait par pyrolyse, solvolysse ou vapo-thermolysse et entraîne peu de dégradation des fibres [J. Lachaud et al., 2008]. Il est donc tout à fait envisageable de réutiliser les fibres récupérées pour produire de nouveaux matériaux composites très résistants avec les fibres recyclées.

Afin de susciter une demande pour les fibres de carbone recyclées, il faut donner de la valeur ajoutée à ces fibres en démontrant la faisabilité de fabriquer des pièces composites (fibre recyclée+matrice) de haute qualité ; c'est l'objet de cette thèse.

2. Positionnement des composites à fibres recyclées réalignées par rapport à l'état de l'art

Le recyclage d'un composite à fibres de carbone exige la maîtrise de 2 étapes essentielles : la suppression de la matrice et la remise en forme des fibres de carbone recyclées. La réalisation de matériaux composites à hautes performances demande une bonne maîtrise des architectures de fibres recyclées semi-longues (fort taux volumique de fibres, alignement dans le sens des efforts, homogénéité du renfort) ainsi que des nouvelles liaisons interfaciales carbone/matrice.

La possibilité du recyclage des matériaux composites à fibres de carbone a été démontrée en ce qui concerne la séparation fibre/ matrice [C. Morin et al., 2012], nous ne l'étudierons pas dans cette thèse.

Il existe plusieurs types de technologie pour la remise en forme des fibres de carbone recyclées semi-longues [J. Lachaud et al., 2008] [G. Oliveux et al., 2017] :

- 1) Les technologies d'injection en mélange avec une résine thermoplastique (figure1-1) sont les plus faciles à mettre en œuvre mais impliquent l'utilisation de fibres courtes (<10 mm) [K. Stoeffler et al., 2013], [H. Han et al., 2012], [K.H. Wong et al., 2012]. L'orientation des fibres, liée au seul écoulement lors du procédé d'injection, est difficile à maîtriser. De plus, le taux de fibres est également très faible (<30%) et ne permet donc pas d'exploiter les excellentes résistance (de 50 MPa à 200 MPa) et rigidité (de 15 GPa à 30 GPa) des fibres de carbone recyclées.

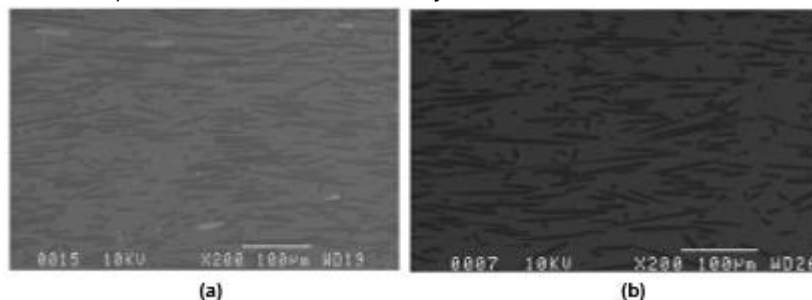


Figure 1-1 Résultats microscopiques des composites FCr/PPS. (a) 40 wt% de fibres de carbone recyclées viennent de préimprégnés ; (b) 40 wt% de fibres de carbone recyclées viennent de PANEX@35 [K. Stoeffler et al., 2013]

- 2) Les procédés d'alignement hydrauliques sont basés sur le principe qui consiste à mettre des fibres de carbone courtes en suspension dans un fluide en mouvement afin de les aligner. Les méthodes papetières permettent de réaliser des mats de fibres courtes (< 30 mm) faiblement alignées [J. Wölling et al., 2017] [K. Giannadakis et al., 2011]. Les méthodes les plus performantes sont les tambours rotatifs (figure 1-2) [T.A. Turner et al., 2010], [N. van de Werken et al., 2019], [Z. Liu et al., 2021] et le procédé HiPerDiF [P. Aravindan et al., 2020], [R. J. Tapper et al., 2019], [M. L. Longana et al., 2016] car elles permettent d'obtenir un excellent alignement. Les résistances obtenues sont très intéressantes (de 400 MPa à 800 MPa). Cependant, ces méthodes imposent d'utiliser des fibres courtes (longueurs entre 3 et 12 mm), ce qui engendre des rigidités de l'ordre de 80 GPa seulement.

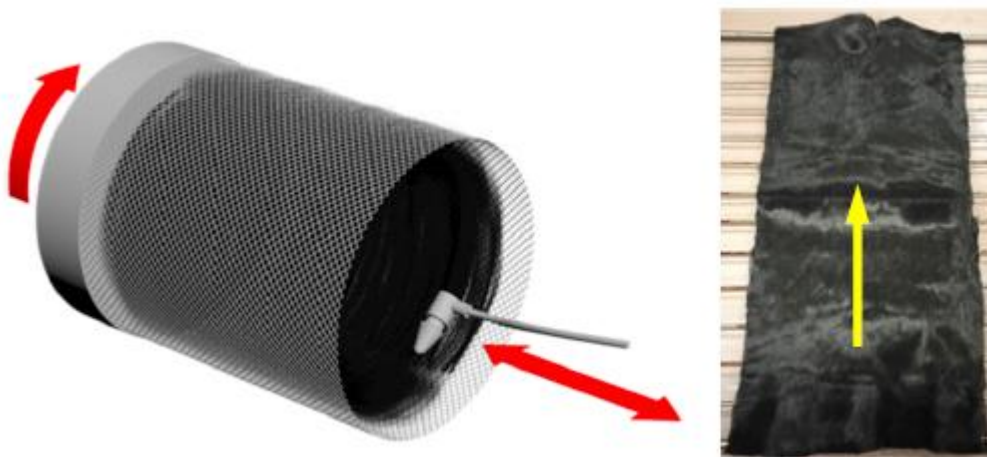
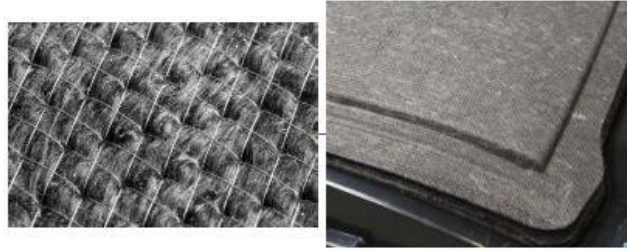


Figure 1-2 Aligned partial drum [N. van de Werken et al., 2019]

- 3) Le cardage de fibres de carbone recyclées semi-longues est généralement associé à des technologies d'imprégnation de résine thermosable classique (RTM). Ce procédé constitue une remise en forme partielle des fibres de carbone recyclées (figure 1-3). C'est à ce jour la seule voie de valorisation industrielle de la fibre de carbone recyclée [G-TEX M], [G-TEX TM]. L'opération de cardage est éventuellement suivie d'une phase d'étirement pour obtenir des bandes utilisables sur des robots de dépose automatisée [O. Rimmel et al., 2019], ou sous forme de non tissé [J. Wölling et al., 2017], [J. Kratz et al., 2017]. Les fibres de carbone peuvent également être mélangées avec des fibres thermoplastiques afin d'obtenir des semi produits carbone/thermoplastique [B. Xiao et al., 2019], [MH Akonda et al., 2014], [C. Froemder et al., 2018].



Mechanical carding is used by SGL Automotive Carbon Fibers (Wackersdorf, Germany) to process CF scrap from weaving and preform kitting for the BMW i-series CFRP Life Module production into stitched nonwoven materials (left) which are then molded into the i3's rear seat structure and roofs for both the i3 and i8 (right). SOURCE: BMW

Figure 1-3 Voiles de fibres recyclées SGL pour pièces automobiles haut de gamme (BMW) [G. Gardiner, 2014]

Malheureusement, ce réalignement partiel ne permet pas d'obtenir des composites de grande rigidité (de 20GPa à 50 GPa) [B. Xiao et al., 2019],[O. Rimmel et al., 2019] et le cardage présente d'importants risques HSE car les fibres de carbone peuvent être scindées et coupées pour former de très courtes fibres.

- 4) Cette thèse s'appuie sur la technologie de réalignement du laboratoire I2M Bordeaux (figure 1-4) qui consiste à transformer des morceaux de tissus de fibres de carbone (chutes sèches ou issues d'un procédé de séparation fibre/matrice) en une bande continue de fibres de carbone recyclées semi-longues (50mm – 250mm).

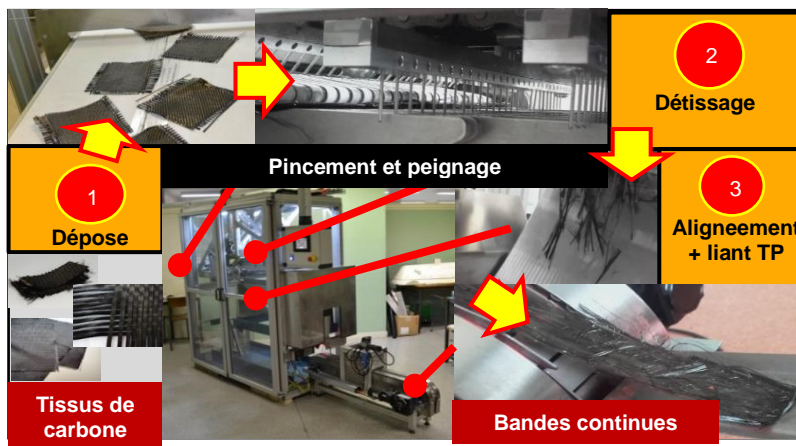


Figure 1-4 Technologie de réalignement I2M / Université de Bordeaux

Les morceaux de tissus sont déposés sur un tapis roulant puis détissés sachant que des fibres non liées peuvent également être traitées de la même manière. Les fibres de carbone tombent dans un bac et sont alignées par vibrations. Environ 2% de poudre thermoplastique est ajoutée pour servir de liant. Les fibres alignées sont mises sous forme de bande de 35mm de largeur puis la poudre thermoplastique est fondue par un flux d'air chaud afin de consolider la bande et la rendre manipulable.

Cette technologie de remise en forme de fibres de carbone recyclées offre les avantages suivants :

- (i) Elle permet le traitement de fibres recyclées « semi longues » de 50 à 250mm.
- (ii) L'alignement des fibres dans le demi produit est très bon : 90% des fibres ont une orientation comprise entre $\pm 10^\circ$.

- (iii) Les fibres de carbone recyclées ne sont ni endommagées ni cassées, ce qui permet de maîtriser la longueur des fibres et de minimiser les problèmes HSE.

Il est alors possible de réaliser des matériaux composites à fort taux de fibres (55-60%) et donc des matériaux de grande résistance (500-900 MPa) [A. Gillet et al., 2015] qui exploitent au mieux les caractéristiques des fibres de carbone recyclées (FCR). L'utilisation de fibres longues (longueur supérieure à 150 mm) permet d'atteindre une rigidité quasi équivalente à celle d'un composite unidirectionnel neuf [G. Oliveux et al., 2017].

Les matériaux composites à fibres de carbone recyclées réalignées par la technologie I2M présentent une architecture particulière. Les conséquences de cette architecture sur leurs propriétés seront étudiées dans cette thèse.

Le filage est une méthode textile qui consiste à appliquer une torsion à un ruban issu d'étapes de cardage puis d'étirage. Le ruban utilisé est systématiquement un mélange de fibres de carbone et de fibres thermoplastiques PP [M.H. Akonda et al., 2012] ou PA6 [M. Hengstermann et al., 2016], [M.M.B. Hasan et al., 2017], [M.M.B. Hasan et al., 2018], [M.M.B. Hasan et al., 2019]. Cette torsion confère au fil une tenue mécanique suffisante pour être mis en œuvre par enroulement, puis consolidé par thermo-compression. Les composites ainsi réalisés présentent des résistances élevées (jusqu'à 1000 MPa [M.M.B. Hasan et al., 2019]), Cependant, l'étape préalable de cardage limite la longueur des fibres de carbone recyclées, et les rigidités obtenues en sont donc impactées.

La figure 1.5 permet de comparer les performances spécifiques des différents matériaux composites réalisées à partir de fibres de carbone recyclées.

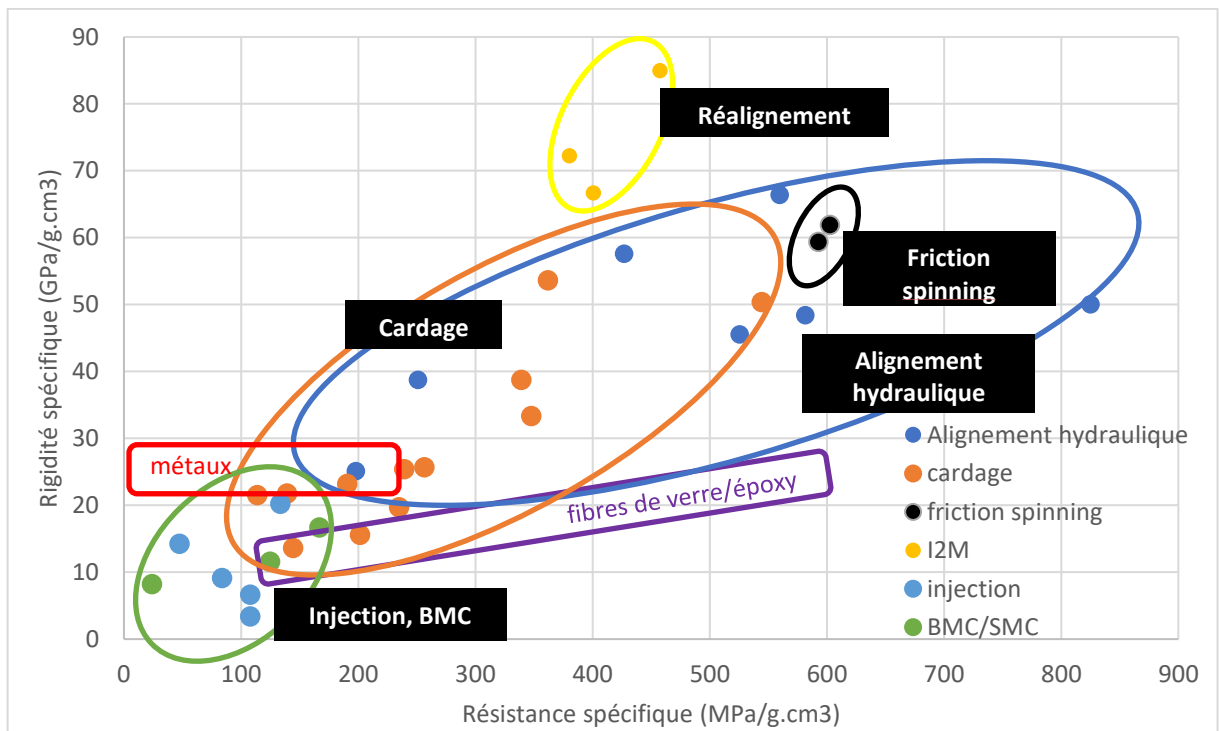


Figure 1-5 Comparaison des performances spécifiques des composites à base de FCr

La figure 1-5 démontre que c'est bien la forme donnée aux fibres de carbone recyclées qui conditionne la résistance des composites. Les procédés industrialisés comme l'injection, le BMC de fibres courtes ou le cardage, aboutissent à des performances comparables à celles des matériaux classiques ; seuls des procédés en voie de développement comme l'alignement hydraulique, le friction spinning ou le procédé d'alignement I2M, confèrent aux composites FCr de très hautes propriétés mécaniques de résistance et rigidité spécifiques.

3. Objectifs des travaux réalisés à l'I2M et au PIMM sur le recyclage des fibres de carbone

Les fibres de carbone recyclées provenant de pyrolyse ou de solvolysse, ne sont plus revêtues d'ensimage et sont discontinues. La résistance des composites à fibres de carbone discontinues dépend (i) de l'alignement des fibres, (ii) de la longueur de transfert de charge entre deux fibres et (iii) des propriétés de l'interface entre deux fibres. Les architectures de fibres recyclées semi longues avec un très bon alignement ont été produites par la technologie de réalignement brevetée du laboratoire I2M Bordeaux qui permet d'assurer une exploitation optimale des propriétés des fibres de carbone recyclées. Dans le but de maîtriser et d'optimiser les propriétés du nouveau composite (à fibres discontinues), les mécanismes de transfert de charge entre fibres ont été étudiés, et les propriétés utiles de la matrice ont été identifiées. Une attention particulière a été portée au calcul de la longueur de transfert de charge entre deux fibres discontinues en fonction des propriétés de l'interface fibre recyclée / matrice thermoplastique. En effet, notre objectif est non seulement de rechercher des solutions optimales en termes de résistance mais aussi des solutions qui permettent de limiter l'impact environnemental, d'où notre choix des matrices thermoplastiques (y compris recyclées) pour cette étude. [K.H. Wong et al., 2012] [E. Yildirim et al., 2015].

Ce travail sur les études interfaciales sera poursuivi dans le but de chercher à associer les fibres de carbone recyclées à une matrice thermoplastique technique, qui peut elle-même être recyclée ou bio-sourcée, l'objectif final étant de démontrer la faisabilité de pouvoir fabriquer des nouveaux composites 100% recyclés.

L'objectif de mettre en œuvre des composites à base de fibres recyclées ne peut avoir un intérêt que si ces nouveaux composites sont non seulement performants mais sont aussi à faible impact environnemental. Une étude de cet impact sera réalisée. L'objectif à terme sera de pouvoir réaliser l'évaluation environnementale dès les premiers choix technologiques afin de définir les couples de fibres de carbone recyclées / matrice thermoplastique technique conduisant à des matériaux performants aussi bien techniquement que sur le plan environnemental (ex : choix d'une résine thermoplastique recyclée, bio-sourcée, ajout de nouvel ensimage, ...).

Dans le premier chapitre, un modèle numérique a été développé pour simuler le transfert de charge entre deux fibres discontinues se recouvrant partiellement. L'objectif est d'identifier les propriétés mécaniques de l'interface entre deux fibres et d'étudier son influence sur la résistance du composite à fibres discontinues.

Le deuxième chapitre a pour objectif de mettre en évidence l'influence de l'architecture fibreuse sur la rupture d'un composite à fibres recyclées, les faibles longueurs de recouvrement (5mm) représentant des défauts de l'architecture. Deux modèles numériques ont été développés pour simuler deux types de d'architecture de recouvrement. Le premier modèle, appelé joints en «escalier», a permis de simuler des longueurs de recouvrement disposées de façon asymétrique et le deuxième, appelé joints en «emboîtement» a permis de simuler des longueurs de recouvrement disposées de façon symétrique.

Les résultats des simulations numériques de ces 2 chapitres ont été validés par comparaison avec des résultats expérimentaux.

Le troisième chapitre présente les conditions de mise en œuvre et les tests pour les composites fibres de carbone recyclées / matrice thermoplastique (PA, PC, PET). Ce chapitre démontre d'une part qu'il est possible d'obtenir de forts taux de fibres (>50%) en

imprégnant des fibres de carbone recyclées avec une matrice thermoplastique et d'autre part que les caractéristiques des résines choisies permettent d'obtenir une résistance à rupture du composite supérieure à celle obtenue avec l'utilisation d'une résine époxy.

Enfin, après avoir démontré que des matrices thermoplastiques renforcées par des fibres de carbone recyclées permettaient d'obtenir des matériaux composites avec des caractéristiques très intéressantes, l'objectif du quatrième et dernier chapitre est de proposer des matériaux performants mais aussi à faible impact environnemental grâce à une utilisation intelligente des fibres de carbone recyclées réalignées. Une analyse environnementale a ainsi été proposée sur l'exemple d'une pale d'éolienne portative en comparant les impacts de la matière première, de la fabrication et de la fin de vie de la pièce réalisée avec différents matériaux (alliage léger, composite fibres de verre, composites à fibres recyclées). Cela démontre l'intérêt des fibres de carbone recyclées associées à une matrice thermoplastique recyclée pour minimiser l'impact environnemental tout en maximisant les performances mécaniques.

4. Fibres de carbone utilisées dans le cadre de cette thèse

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la morphologie de l'architecture fibreuse de fibres de carbone sur les propriétés des composites et non pas d'étudier l'influence du procédé de séparation fibres/matrice. L'emploi de fibres de carbone issues de pyrolyse ou de vapo thermolyse aurait introduit un biais dans l'interprétation en raison de grandes dispersions en termes de dégradation, de longueur, de rectitude et de qualité de surface. En conséquence, des fibres de carbone vierges de deux types différents ont été utilisées dans ces travaux en fonction des objectifs recherchés :

- a) Des fibres UD Hexforce® 48300 U 1000 E01 sous forme de plis unidirectionnels pour la modélisation de joints à simple ou double recouvrement ou recouvrements multiples.
- b) Des fibres de carbone CC700 issues de chutes de découpe de taille 100x150mm sous forme de bandes continues de fibres discontinues (longueur de 100 à 150mm). Ces bandes sont réalignées en préformes UD de 150x280mm² à l'aide du procédé de réalignement I2M.

Quelle que soit la configuration, les fibres sont poudrées et ensimées lorsqu'elles sont utilisées avec une matrice époxy et elles sont désensimées (et dépoudrées) par un passage au four à 500°C pendant 16 minutes lorsqu'elles sont utilisées avec une matrice thermoplastique (PA, PET, PC).

**Chapitre 1 : Etude du transfert de charge
entre fibres dans les matériaux composites
à fibres de carbone discontinues**

1. Introduction : modélisation de différents recouvrements de fibres discontinues

Les fibres de carbone recyclées sont généralement des fibres discontinues et incomplètement alignées. Le comportement mécanique des matériaux composites renforcés par ces fibres est donc particulier et différent des composites classiquement étudiés par la théorie des stratifiés et est très dépendant des transferts de charge entre fibres.

Pour modéliser le comportement de tels matériaux, la première étape consiste à modéliser le comportement d'une interface entre deux fibres se recouvrant en partie. Il existe une solution analytique pour le cas du joint « à simple recouvrement », appelée modèle de Yuan [H. Yuan et al., 2004]. Le but est de mettre en place une démarche nous permettant d'identifier les propriétés de cette interface. Une première étape consistera à développer un modèle numérique du comportement qui sera confronté à la solution analytique de Yuan. Ce modèle servira de base pour simuler numériquement d'autres géométries. Dans un second temps, des essais expérimentaux du modèle du joint à double recouvrement seront confrontés aux résultats des simulations numériques pour identifier l'énergie de rupture de l'interface (G_{IIC}) et la contrainte de cisaillement maximale de l'interface (τ_f). Puis le modèle du joint à simple recouvrement sera confronté aux essais expérimentaux pour valider le modèle numérique et les paramètres mécaniques de l'interface (G_{IIC} et τ_f).

2. Simulation numérique de la résistance d'un joint à simple recouvrement

2.1 Solution analytique de Yuan

2.1.1 Domaine modélisé

Un modèle analytique d'interface de fibres à simple recouvrement a été proposé par Yuan et al [H. Yuan et al., 2004]. Ce modèle est un modèle tri-couche composé de deux fibres se recouvrant partiellement sur une longueur « L_r » avec une interface adhésive entre les deux. La longueur « L_r » du modèle représente la longueur de recouvrement entre 2 fibres (figure 1-6).

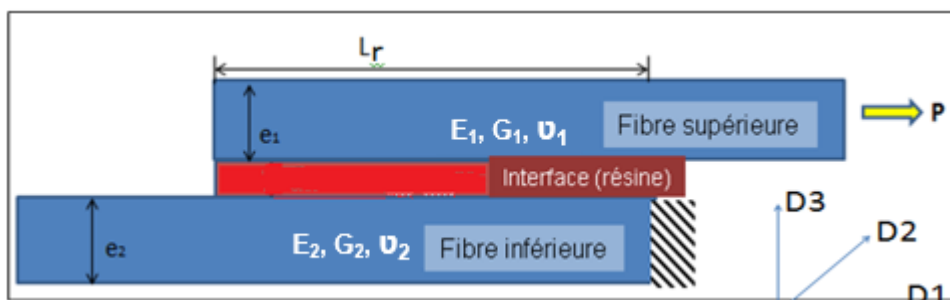


Figure 1-6 Domaine modélisé par le modèle analytique de Yuan [H. Yuan et al., 2004]

Chaque fibre possède une épaisseur e_i , un module d'Young E_i et un module de cisaillement G_i . La largeur (dans la direction perpendiculaire au plan) est notée b . Un modèle mécanique

simple pour cette liaison est établi en traitant les deux fibres comme étant soumises uniquement à des déformations axiales tandis que l'interface adhésive est supposée être soumise uniquement à des déformations de cisaillement.

2.1.2 Traitement de l'interface entre 2 fibres

Dans ce modèle, l'interface entre les deux fibres est considérée comme une couche de matériau endommageable possédant une loi de comportement particulière. Ce modèle de comportement est une loi de contrainte de cisaillement (τ) en fonction du saut de déplacement (δ) de l'interface (figure 1-7). L'aire sous la courbe est l'énergie de rupture de l'interface (G_{IIC}) et le paramètre « k » est la raideur du matériau de l'interface.

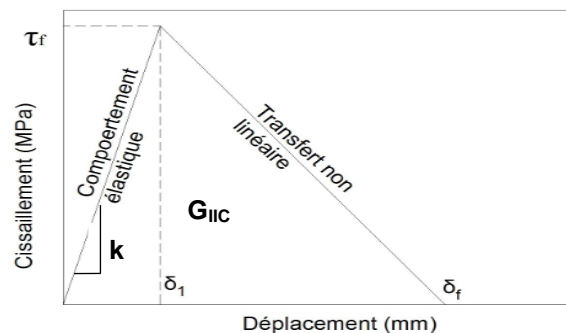


Figure 1-7 Loi de contrainte de cisaillement / déplacement de l'interface [S. Chataigner, 2008]

Cette loi peut être décrite en 3 zones :

- Zone 1 ($0 < \delta < \delta_1$) : domaine élastique avec une loi linéaire cisaillement / déplacement. Lorsque δ atteint δ_1 , la contrainte de cisaillement atteint la valeur maximale τ_f ;
- Zone 2 ($\delta_1 < \delta < \delta_f$) : progression de l'endommagement ; le cisaillement décroît de manière linéaire avec δ jusqu'à $\tau=0$ pour $\delta = \delta_f$;
- Zone 3 ($\delta_f < \delta$) : l'interface est rompue, la contrainte de cisaillement est nulle $\tau = 0$ (la fissure se propage dans l'interface).

2.1.3 Adaptation de la solution analytique de Yuan

Les champs de contrainte seront notés σ_{jj}^i pour les contraintes axiales et τ_{jk}^i pour les contraintes de cisaillement. Dans ces paramètres, i prend la valeur 1 ou 2 selon la fibre considérée (1= fibre supérieure ; 2= fibre inférieure), j correspond à la direction D1 et k correspond à la direction D2 ou D3 (figure1-8).

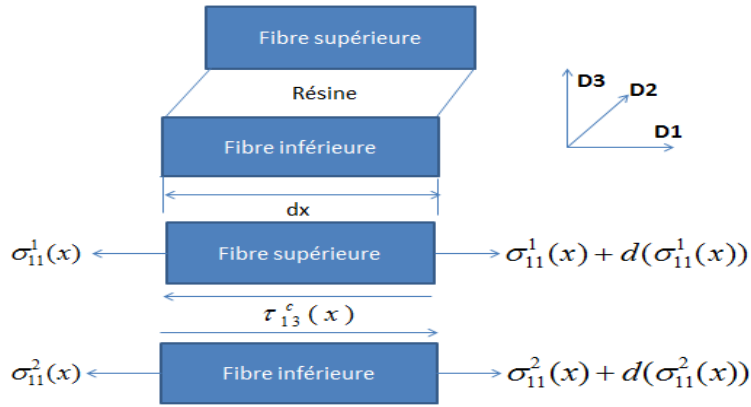


Figure 1-8 Déformation et équilibre dans le modèle de simple recouvrement

La contrainte de cisaillement peut s'écrire en fonction de la déformation de l'interface :

$$\tau = f(\delta) = \begin{cases} \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta & \text{si } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta) & \text{si } \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f \\ 0 & \text{si } \delta \geq \delta_f \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\text{avec } \delta_1 = \frac{\tau_f}{k} \text{ et } \delta_f = \frac{2G_{IIC}}{\tau_f} \quad (1.2)$$

Où k : Raideur du matériau de l'interface (figure 1-5)

G_{IIC} : Énergie de rupture de l'interface (figure 1-5)

La couche d'interface est principalement soumise à du cisaillement, donc la rupture interfaciale se fait en mode II.

Sur la base de ces hypothèses, les équations suivantes sont obtenues (condition d'équilibre sur la figure 1-6) :

Contrainte de cisaillement :

$$\tau_{13}^c(x) = -e_1 \cdot \frac{d(\sigma_{11}^1(x))}{dx} \quad \tau_{13}^c(x) = e_2 \cdot \frac{d(\sigma_{11}^2(x))}{dx} \quad (1.3)$$

Equilibre :

$$e_1 \sigma_{11}^1(x) + e_2 \sigma_{11}^2(x) = 0 \quad (1.4)$$

Où $\tau_{13}^c(x)$: Contrainte de cisaillement de l'interface

$\sigma_{11}^1(x)$: Contrainte normale pour la fibre supérieure

$\sigma_{11}^2(x)$: Contrainte normale pour la fibre inférieure

e_1 : Épaisseur de la fibre supérieure

e_2 : Épaisseur de la fibre inférieure

Les équations constitutives pour les deux fibres peuvent être exprimées par :

$$\sigma_{11}^1(x) = E_{11}^1 \frac{d\delta^1}{dx} \quad (1.5)$$

$$\sigma_{11}^2(x) = E_{11}^2 \frac{d\delta^2}{dx} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon = \frac{d\delta}{dx} = \frac{d\delta^1}{dx} - \frac{d\delta^2}{dx} \quad (1.7)$$

Où E_{11}^1 : Module de Young sous la direction normale (fibre supérieure)

E_{11}^2 : Module de Young sous la direction normale (fibre inférieure)

ε : Déformation entre la fibre supérieure et la fibre inférieure

Donc on peut obtenir la déformation (ε) dans l'interface entre les deux fibres :

$$\varepsilon = \frac{d\delta}{dx} = \frac{\sigma_{11}^1(x)}{E_{11}^1} - \frac{\sigma_{11}^2(x)}{E_{11}^2} \quad (1.8)$$

Lorsque $0 \leq \delta \leq \delta_1$ (étape 1), l'interface est dans le domaine élastique, les expressions du déplacement $\delta(x)$, de la contrainte de cisaillement $\tau_{13}^c(x)$ et de la contrainte normale de la fibre supérieure $\sigma_{11}^1(x)$ sont les suivantes :

$$\delta(x) = \frac{\delta_1 e_1 \sigma_{11}^1(x=0)}{\tau_f} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} \quad (1.9)$$

$$\tau_{13}^c(x) = e_1 \sigma_{11}^1(x=0) \lambda_1 \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} \quad (1.10)$$

$$\sigma_{11}^1(x) = \sigma_{11}^1(x=0) \frac{\sinh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)} \quad (1.11)$$

avec

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{\tau_f}{\delta_1} \left(\frac{1}{E_{11}^1 e_1} + \frac{1}{E_{11}^2 e_2} \right)} \quad (1.12)$$

Lorsque $\delta_1 \leq \delta \leq \delta_f$ (étape 2), on considère que l'interface est endommagée sur une longueur a . Donc on peut obtenir les expressions suivantes pour le déplacement, le cisaillement et la contrainte normale de la fibre supérieure en fonction du paramètre a dans le domaine élastique :

$$\delta(x) = \delta_1 \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1 (L-a))} \quad (1.13)$$

$$\tau_{13}^c(x) = \tau_f \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1 (L-a))} \quad (1.14)$$

$$\sigma_{11}^1(x) = \frac{\tau_f}{e_1 \lambda_1} \frac{\sinh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 (L-a))} \quad (1.15)$$

Les expressions du déplacement $\delta(x)$, du cisaillement $\tau_{13}^c(x)$ et de la contrainte normale de la fibre supérieure $\sigma_{11}^1(x)$ dans la zone endommagée sont les suivantes :

$$\delta(x) = \delta_1 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1(L-a)) \sin(\lambda_2(x-L+a)) - \cos(\lambda_2(x-L+a)) + \frac{\delta_f}{\delta_f - \delta_1} \right) \quad (1.16)$$

$$\tau_{13}^c(x) = \tau_f \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1(L-a)) \sin(\lambda_2(x-L+a)) - \cos(\lambda_2(x-L+a)) \right) \quad (1.17)$$

$$\sigma_{11}^1(x) = \frac{\tau_f}{e_1 \lambda_1} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1(L-a)) \sin(\lambda_2(x-L+a)) - \cos(\lambda_2(x-L+a)) \right) \quad (1.18)$$

avec

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} \left(\frac{1}{E_{11}^1 e_1} + \frac{1}{E_{11}^2 e_2} \right)} \quad (1.19)$$

Pour résoudre le système, il convient de trouver la valeur de a. La contrainte normale dans la fibre supérieure $\sigma_{11}^1(x)$ en $x=L$ est égale à la contrainte appliquée. Le système est résolu par itérations successives.

Lorsque $\delta > \delta_f$ (étape 3), une partie de l'interface est fissurée et la nouvelle longueur endommagée notée a_u peut être déterminée en utilisant les expressions précédentes :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1(L-a_u)) = \frac{1}{\tan(\lambda_2 a_u)} \quad (1.20)$$

Lors de cette étape (étape 3), la contrainte totale reste constante, et le front de fissure avance.

En choisissant les propriétés reportées dans le tableau 1-1, la solution analytique de la contrainte maximale dans le composite en fonction de la longueur de recouvrement L_r variant de 5mm à 60mm est représentée sur la figure 1-9.

$E_{11}^1 = E_{11}^2$	k	G_{IIC}	τ_f	$e_1=e_2$
120 GPa	1,30E+06 N/mm	0,62KJ/m ²	6 MPa	0,25 mm

Tableau 1-1 Propriétés du composite

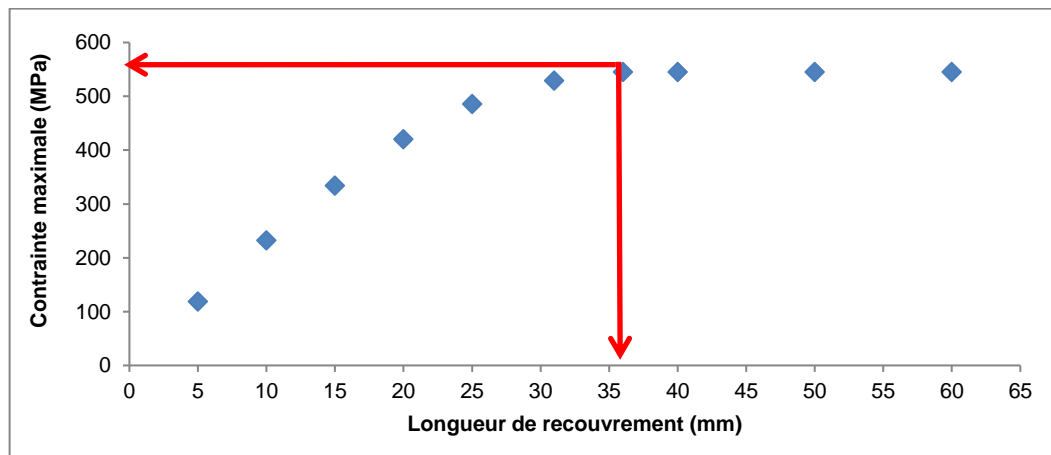


Figure 1-9 Solution analytique du modèle de Yuan de contrainte maximale du composite en fonction de la longueur de recouvrement

La solution du modèle montre que (figure 1-7) :

- (i) Tout d'abord la résistance du composite augmente avec la longueur de recouvrement L_r ;
- (ii) Ensuite, lorsque la longueur de recouvrement atteint une valeur d'environ 36mm, la contrainte maximale supportée par le recouvrement des deux fibres reste constante et égale à une valeur maximale σ_{max} qui est la résistance maximale d'un composite présentant cette longueur de recouvrement entre les fibres.

Avec les paramètres de Yuan, nous pouvons en déduire que la longueur de transfert de charge L_{TC} est égale à 36mm, ce qui correspond à une résistance de 545,5 MPa.

2.2 Modèle numérique du comportement d'un joint à simple recouvrement avec les conditions aux limites « de Yuan »

2.2.1 Modèle numérique

Dans un premier temps, nous avons mis en place un modèle numérique en se plaçant dans les mêmes conditions que le modèle analytique de Yuan : le modèle est un modèle à deux fibres se recouvrant partiellement avec une interface représentant la résine entre les fibres (figure 1-10). Une fibre est un mélange de filaments UD et de résine. Chaque fibre possède une épaisseur $h=0,25\text{mm}$ et une largeur (dans la direction perpendiculaire au plan) $b=20\text{mm}$. La longueur de recouvrement L_r est variable de 5mm à 60mm.

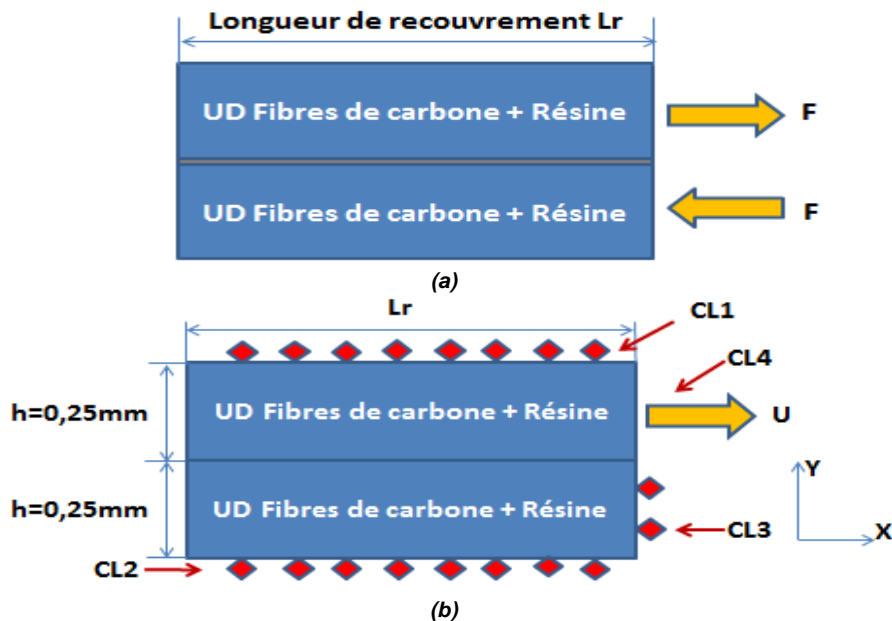


Figure 1-10 Modèles de simulation numérique de Yuan. (a) Modèle analytique de Yuan ; (b) Domaine utilisé pour la simulation numérique (ABAQUS)

Le maillage de référence est de type 'Plan Strain-Linear-CPE4' et la taille des éléments est $0,2\text{mm} \times 0,0625\text{mm}$ (figure 1-11).

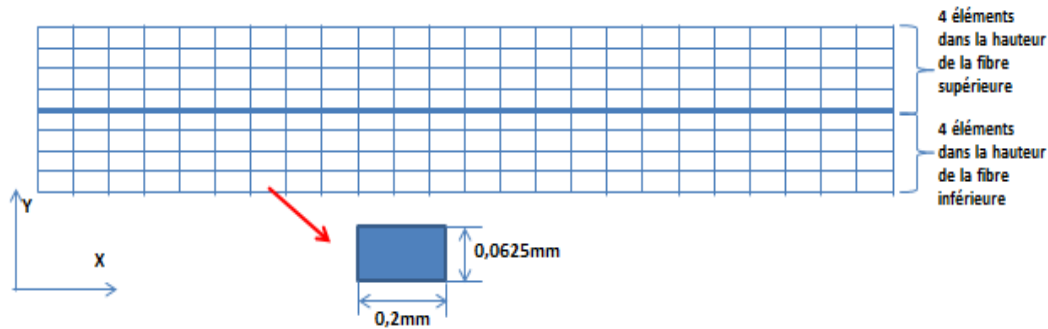


Figure 1-11 Maillage utilisé pour le modèle analytique de Yuan

L'interface endommageable est modélisée dans Abaqus par 'Surface to Surface contact (Standard)' et les nœuds de l'interface possèdent les propriétés de l'interface (figure 1-12).

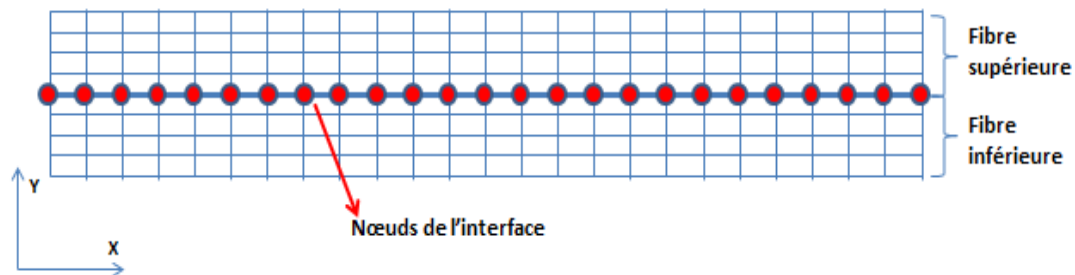


Figure 1-12 Nœuds de l'interface

Les 4 conditions aux limites utilisées pour la simulation numérique sont les suivantes (figure 1-10) :

- (CL1) : Déplacement nul sur Y sur toute la longueur de la fibre supérieure ($U_2=0$) ;
- (CL2) : Déplacement nul sur Y sur toute la longueur de la fibre inférieure ($U_2=0$) ;
- (CL3) : Déplacement nul sur X sur toute la frontière droite de la fibre inférieure ($U_1=0$) ;
- (CL4) : Déplacement en X imposé de 10mm sur toute la frontière droite de la fibre supérieure ($U_1=10\text{mm}$).

Les propriétés des matériaux de l'interface sont répertoriées dans le tableau 1-2(a) et les propriétés des matériaux de la "fibre" (c'est-à-dire des filaments carbone UD + résine) sont répertoriées dans le tableau 1-2(b).

τ_0	τ_f	G_{IC}	G_{IIC}	η	k
3 MPa	6 MPa	0,18 KJ/m ²	0,62 KJ/m ²	2	1,3e6 N/mm

Tableau.1-2(a) Propriétés des matériaux de l'interface

E_{11}	$E_{22}=E_{33}$	$G_{12}=G_{13}$	G_{23}	$\nu_{12}=\nu_{13}$	ν_{23}
120 GPa	10,5 GPa	5,25 GPa	3,48 GPa	0,3	0,5

Tableau.1-2(b) Propriétés des matériaux de la "fibre" (filaments carbone UD + résine)

- k : (figure 1-5), raideur du matériau de l'interface [A. Turon et al., 2006] ;
- η : Paramètre d'interaction en mode mixte pour le critère de Benzeggagh et Kenane [M.L. Benzeggagh et al., 1996] ;
- τ_0 : Contrainte normale maximale de l'interface ;
- τ_f : Contrainte de cisaillement maximale de l'interface ;
- G_{IC} : Energie de rupture à la direction normale ;
- G_{IIC} : Energie de rupture de l'interface à la direction du cisaillement ;

E_{11} : Module de Young dans la direction normale de la "fibre" (filaments carbone UD + résine), qui est la même valeur que E_{11}^1 et E_{11}^2 (tableau 1-1).

Pour afficher les résultats, les nœuds de la frontière droite de la fibre supérieure sont choisis comme des points de référence (figure1-13). Le déplacement est imposé dans la direction X (U1) et la force est calculée dans la direction X (RF1). Les résultats sont donc les courbes force / déplacement aux points de référence.

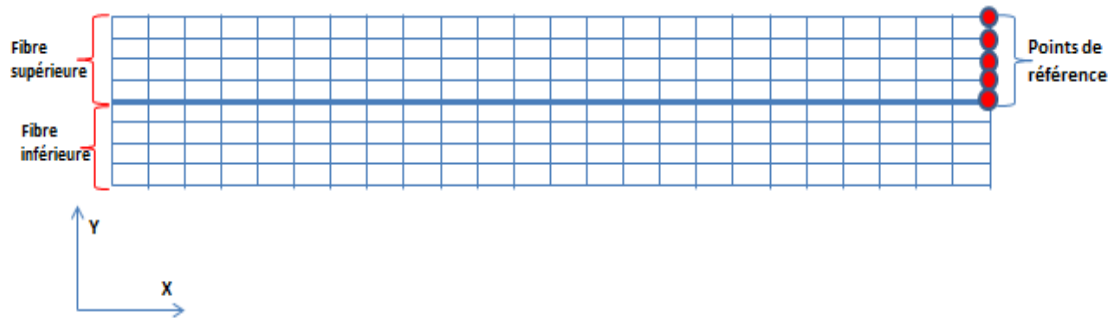


Figure1-13 Points de référence

2.2.2 Influence du maillage

Pour l'étude de l'influence de la taille des mailles, on a fixé la valeur de la longueur recouvrement : $L_r = 5\text{mm}$. Ensuite le nombre d'éléments par millimètre varie de 1 à 100 (la longueur des mailles varie donc de 1mm à 0,01mm). La hauteur des mailles est constante et égale à 0,0625mm ce qui correspond à quatre mailles dans la hauteur d'une fibre. Les résultats de la contrainte maximale en fonction du nombre d'éléments par millimètre sont représentés sur la figure1-14.

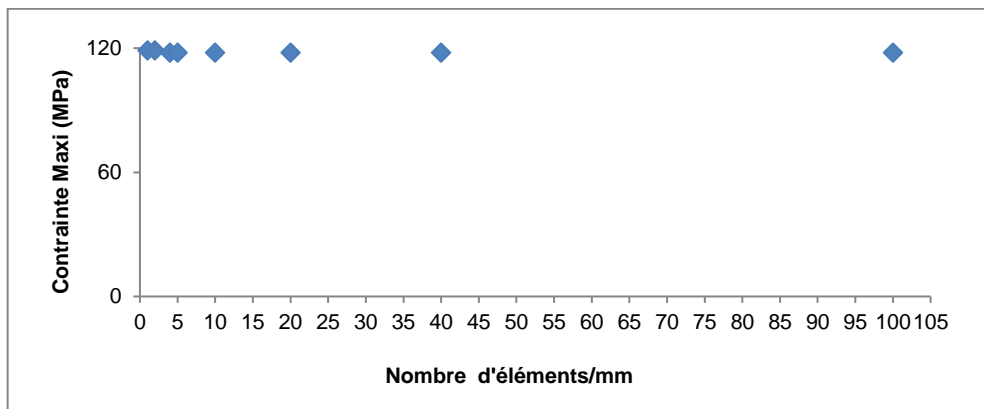


Figure1-14 Influence de la taille des éléments finis ($L_r=5\text{mm}$)

Il apparaît que, entre 1 et 100 éléments par mm, la longueur des mailles n'a aucune influence sur la simulation de la résistance du composite. Pour les simulations ultérieures, la valeur de 5 éléments par mm (longueur de maille=0,2mm) a été jugée suffisante pour obtenir la convergence du modèle.

2.2.3 Simulations numériques

Pour toutes les simulations numériques, le déplacement imposé est fixé à $U_{\text{max}}=10\text{mm}$. Nous avons alors relevé l'évolution de la force dans la direction X (RF1) en fonction du

déplacement dans la direction X (U1) aux points de référence en faisant varier la longueur de recouvrement de 5mm à 60mm (figure 1-15).

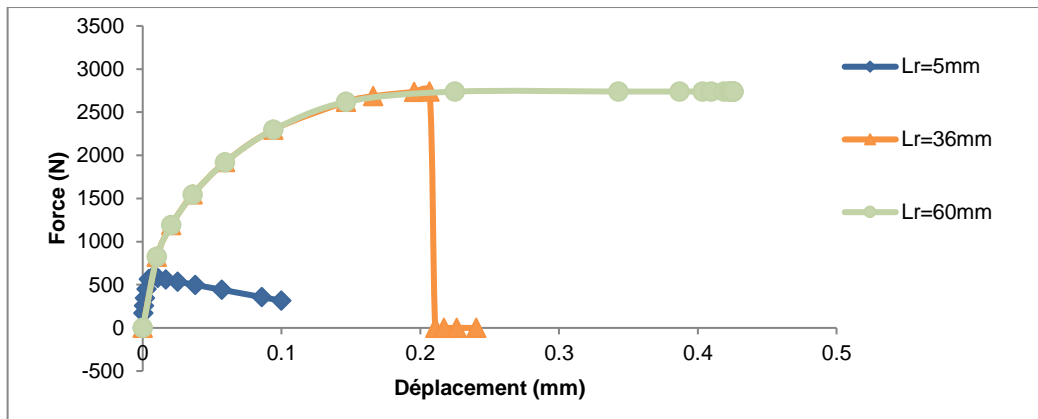


Figure1-15 Comportement Force-Déplacement avec longueur de recouvrement variable de 5mm à 60mm

Il apparaît que, lorsque la longueur de recouvrement augmente de 5mm à 36mm, la force maximale supportée par le composite (simple recouvrement de Yuan) augmente de 589N à 2737N. Ensuite même si la longueur de recouvrement est supérieure à 60 mm, la force maximale supportée reste constante et égale à 2737N.

Nous avons rassemblé dans le tableau 1-3 l'ensemble des résultats. Sachant que la section de la surface sur laquelle est appliquée la force est $S=5\text{mm}^2$, nous avons pu suivre l'évolution de la contrainte maximale en fonction de la longueur de recouvrement (figure 1-16).

Longueur de recouvrement (mm)	Force maximale (N)	Contrainte maximale (MPa)
5	589	118
10	1128	226
15	1669	334
20	2076	415
25	2236	447
30	2395	479
31	2653	531
32	2671	534
33	2700	540
34	2720	543
35	2697	539
36	2737	547
40	2737	547
50	2737	547
60	2739	547,8

Tableau1-3 Résultats des simulations numériques Abaqus (modèle de Yuan)

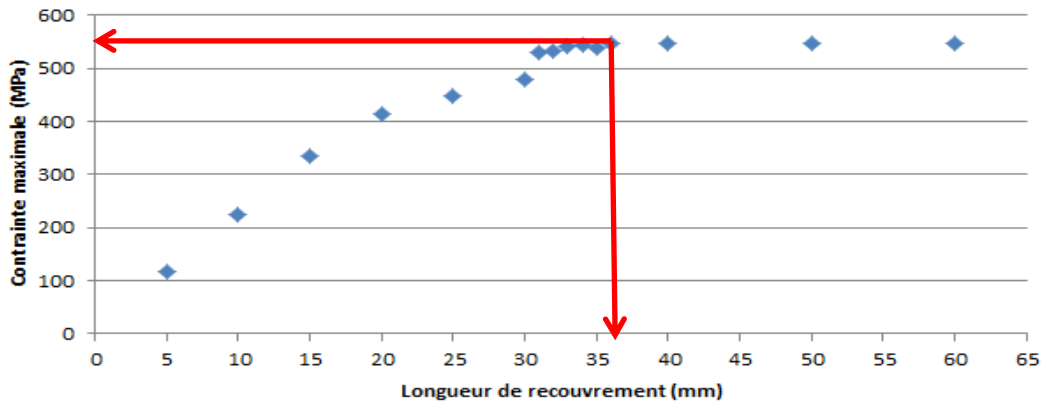


Figure1-16 Résultats de la simulation numérique Abaqus : contrainte maximale en fonction de la longueur de simple recouvrement (conditions de Yuan)

Il apparaît, comme pour le modèle analytique proposé par Yuan, que la résistance du composite augmente d'abord avec la longueur de recouvrement L_r , ensuite, lorsque la longueur de recouvrement atteint une valeur d'environ 36mm, la contrainte maximale supportée par le composite reste constante et égale à une valeur maximale $\sigma_{max} = 550$ MPa. Ces résultats sont donc en accord avec les résultats du modèle théorique.

2.2.4 Etude du cisaillement le long de l'interface ($L_r=40$ mm)

Pour l'étude de la contrainte de cisaillement le long de l'interface, le modèle Abaqus a été utilisé avec la longueur recouvrement $L_r=40$ mm qui est une valeur proche de la longueur à partir de laquelle la contrainte maximale n'évolue plus. Les résultats de la contrainte en fonction de la longueur de recouvrement sont tracés sur la figure 1-17 (a). L'état de cisaillement et de l'endommagement ont été représentés à trois instants différents : instants T1, T2 et T3 sur la figure 1-17(b).

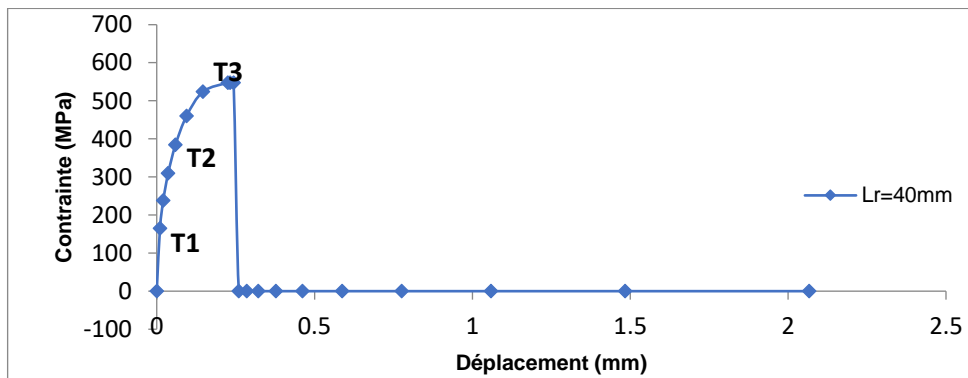


Figure1-17(a) Contrainte à l'extrémité chargée en fonction du déplacement ($L_r=40$ mm)

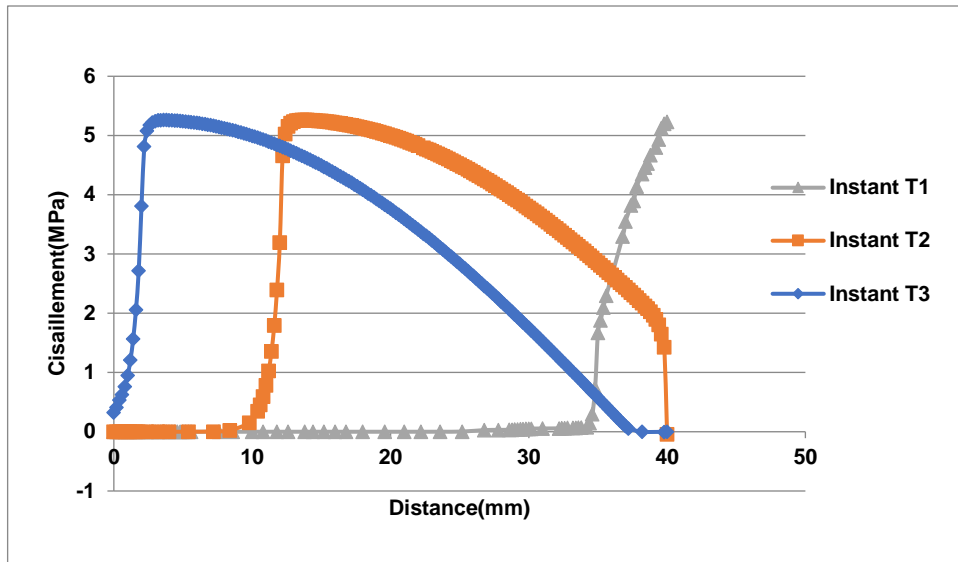


Figure1-17 (b) Etat de cisaillement le long de l'interface à 3 instants T1, T2 et T3

Sur les courbes dans la figure 1-17 (b), il apparaît que :

- à l'instant T1, l'interface est dans le domaine élastique ;
- à l'instant T2, une partie de l'interface est endommagée ;
- à l'instant T3, l'extrémité de l'interface est complètement endommagée et une fissure se propage dans l'interface.

2.3 Comparaison des résultats du modèle ABAQUS/ solution analytique de Yuan

Les courbes de la résistance en fonction de la longueur de recouvrement pour la simulation numérique ABAQUS et pour le modèle analytique de Yuan sont comparées sur la figure 1-18.

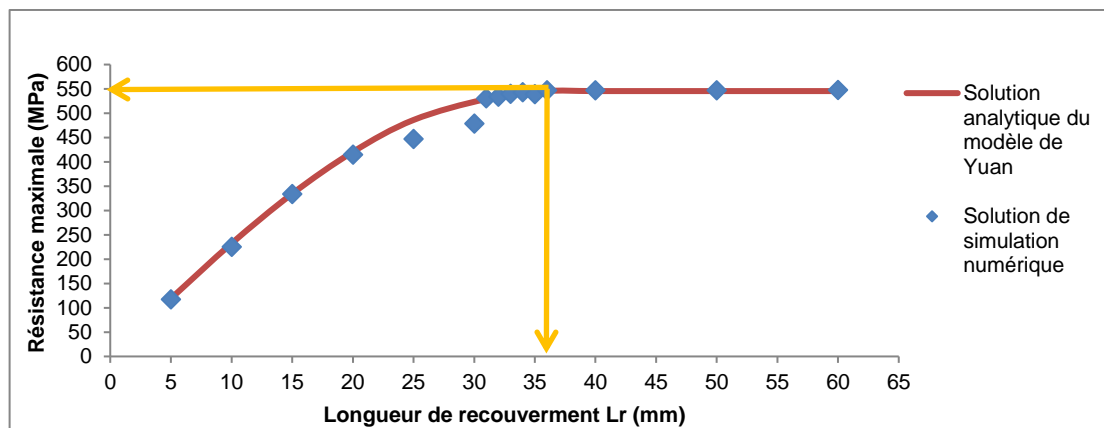


Figure1-18 Comparaison des résultats de la simulation numérique ABAQUS / modèle analytique de Yuan

Il apparaît que la simulation numérique ABAQUS donne des résultats très proches de la solution analytique de Yuan. La contrainte maximale est égale à 546 MPa pour Yuan et 548 MPa pour la simulation numérique. La longueur de transfert de charge est égale à environ 36mm pour Yuan et pour la simulation numérique. Le modèle numérique de simulation de la résistance d'un joint à simple recouvrement est donc validé.

2.4 Influence des paramètres de la contrainte de cisaillement à rupture de l'interface (τ_f) et de l'énergie à rupture (G_{IIC})

La longueur de recouvrement a été fixée à 40 mm pour l'ensemble des simulations numériques réalisées dans ce paragraphe.

Nous avons étudié l'influence de la contrainte de cisaillement à rupture de l'interface (τ_f), sachant que l'énergie à rupture a été fixée à $G_{IIC}=0,62\text{KJ/m}^2$: il apparaît que la contrainte de cisaillement à rupture de l'interface (τ_f) n'a pas d'influence sur la résistance du composite (figure 1-19).

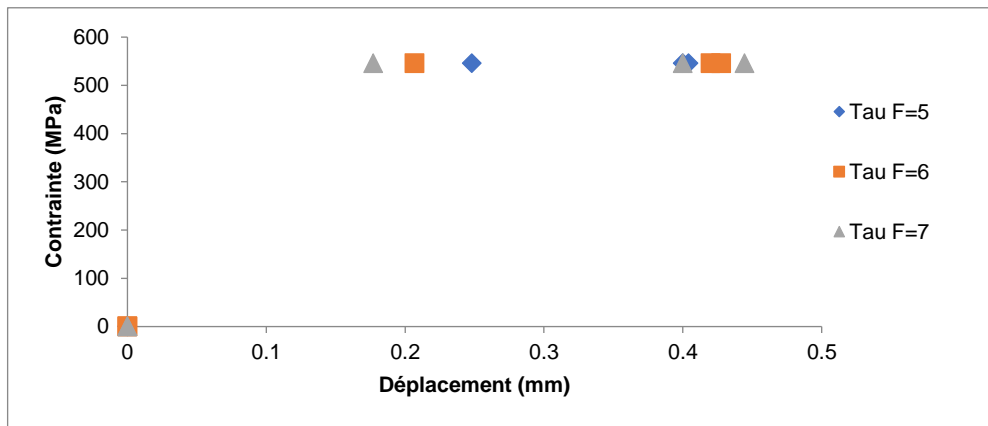


Figure1-19 Influence de τ_f pour modèle analytique de Yuan ($L_r=40\text{mm}$)

Pour l'étude de l'influence de l'énergie à rupture (G_{IIC}), la simulation a été réalisée en fixant la contrainte de cisaillement à rupture de l'interface à $\tau_f=6\text{ MPa}$. Nous avons alors fait varier l'énergie à rupture (G_{IIC}) entre $0,5\text{ KJ/m}^2$ et $0,7\text{ KJ/m}^2$: il apparaît que la contrainte maximale (résistance) augmente avec la valeur G_{IIC} (figure1-20).

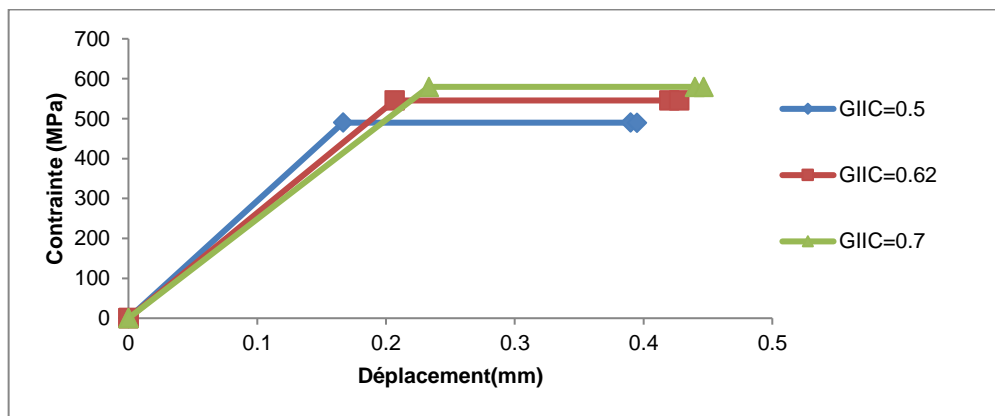


Figure1-20 Influence de l'énergie de rupture de l'interface G_{IIC} ($L_r=40\text{mm}$)

Le modèle numérique développé et validé pour l'étude d'un joint à simple recouvrement va servir de base à la mise en place d'un modèle à double recouvrement qui nous permettra d'identifier les paramètres qui influencent la résistance mécanique d'un composite à fibres discontinues : la longueur de transfert de charge et l'énergie à rupture de l'interface.

3. Modélisation d'un joint à double recouvrement et comparaison avec des essais expérimentaux pour la détermination de τ_f et G_{IIC}

Le travail réalisé dans le paragraphe 2 montre que la longueur de transfert de charge (L_{tc}) entre deux fibres et l'énergie de rupture de l'interface (G_{IIC}) constituent les points-clé de la résistance mécanique des matériaux composites à fibres discontinues. Afin d'appréhender ce mécanisme, le joint à double recouvrement sera utilisé pour définir les propriétés de l'interface, en s'appuyant conjointement sur les résultats de simulations numériques et d'essais expérimentaux (essais référence 6P6C).

3.1 Essais expérimentaux sur éprouvette avec joint à double recouvrement (référence 6P6C)

3.1.1 Mise en œuvre de plaques composites avec joint à double recouvrement

Les éprouvettes sont constituées d'un stratifié de plis unidirectionnels (UD) avec les fibres orientées dans la direction de la charge (Figure1-21). 6 plaques avec différentes longueurs de recouvrement ont été réalisées pour démontrer l'effet de ce paramètre sur les propriétés du composite.

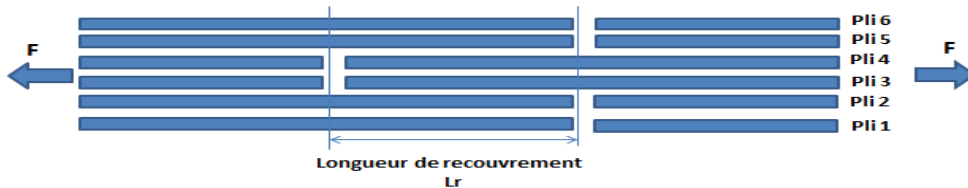


Figure1-21 Schéma des stratifiés « 6P6C » avec joint à double recouvrement

Les fibres utilisées sont des UD Hexforce® 48300 U 1000 E01. Chaque pli est déposé dans le moule de dimensions 150mm×280mm et enduit de résine Araldite® LY5052. Puis le moule est fermé et mis dans une presse à plateaux chauffants à la température $T=40^{\circ}\text{C}$. Les cycles en pression et température en fonction du temps sont tracés sur la figure 1-22. Les caractéristiques des différentes éprouvettes sont rassemblées dans le tableau 1-4. Le nom des plaques permet d'identifier leur longueur de recouvrement. Par exemple, l'éprouvette nommée 6P6C15 est l'éprouvette pour laquelle la longueur de recouvrement théorique est égale à 15 mm.

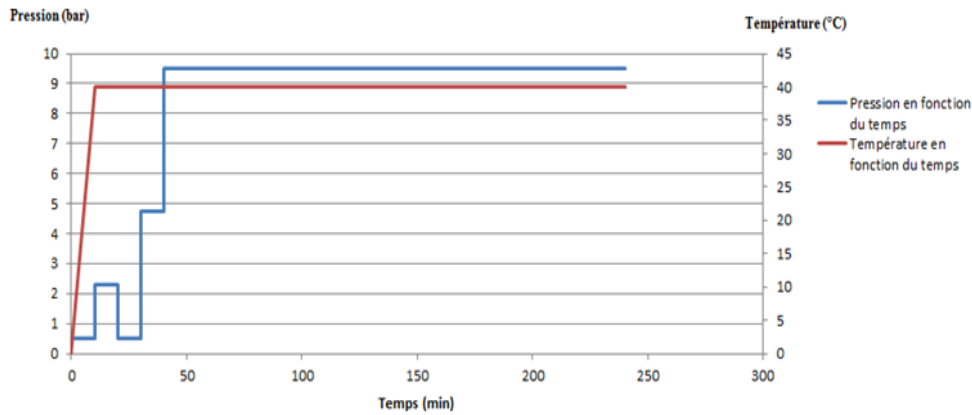


Figure1-22 Cyclage de la pression et de la température en fonction du temps

N° de plaque	Longueur de recouvrement théorique L_{RT} (mm)	Masse de carbone (g)	Masse de plaque (g)	Taux massique de fibres (%)
6PN	Fibres continues	76,12	97	78,47
6P6C5	5	84	95	88,42
6P6C11	11	83,8	105	79,81
6P6C15	15	75	101	74,26
6P6C20	20	75	103	72,82
6P6C75	75	77	107	69,81
6P6C105	105	75	96	78,13

Tableau.1-4 Paramètres de la fabrication des 6 plaques composites à double recouvrement ($L_r=5mm$ à $L_r=105mm$)

3.1.2 Mesure des longueurs de recouvrement

Après la fabrication des plaques, des talons verre-époxy sont collés aux extrémités. Chaque plaque est découpée en 6 éprouvettes de largeur $L_1=20mm$, d'épaisseur $e \approx 1mm$ et de longueur $L_2=280mm$. Les éprouvettes sont sollicitées en traction (Figure1-23) à une vitesse $V=2mm/min$. Nous pouvons alors mesurer la longueur de recouvrement.

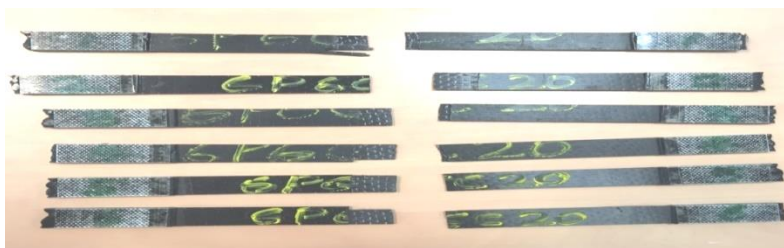


Figure1-23 Epreuves rompues après essai de traction

La longueur de recouvrement réelle a été mesurée à l'issue de l'essai avec un régle sur chaque éprouvette rompue (Figure1-24). Les longueurs mesurées pour chaque éprouvette ont été récapitulées dans le tableau 1-5.



Figure1-24 Longueur de recouvrement mesurée après essai de traction ($L_{Théorique}=15mm$ et $L_{mesurée}=13mm$)

N° de plaque	Longueur de recouvrement théorique L_{RT} (mm)	Longueur de recouvrement mesurée L_{RM} (mm)
6PN	Fibres continues	Fibres continues
6P6C5	5	2-6-5-3-3-6
6P6C11	11	9-8-10-11-11
6P6C15	15	12-12-12-13-13-15
6P6C20	20	21-20-20-19-20-20
6P6C75	75	72-71
6P6C105	105	101-100-100-100-101-101-101

Tableau.1-5 Longueur mesurée des 6 plaques à double recouvrement ($L_r=5mm$ à $L_r=105mm$)

3.1.3 Calcul de la contrainte à rupture en traction du joint à double recouvrement et résultats des essais de traction

Les architectures avec joint à double recouvrement (réf 6P6C) et avec des fibres de carbone continues (réf 6PN) réalisés pour l'étude sont représentées sur les figures 1-23(a) et 1-23 (b). La largeur du domaine des figures 1-25(a) et 1-25(b) est L_1 . L'épaisseur du pli est e .

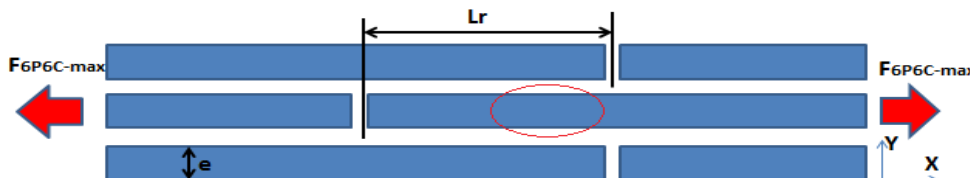


Figure1-25 (a) Architecture simple d'une plaque avec joint à double recouvrement (3 couches = 6 plis)



Figure1-25 (b) Architecture simple d'une plaque avec fibres de carbone continues (3 couches = 6 plis)

Dans l'hypothèse d'une rupture des renforts, la résistance théorique d'une plaque peut être évaluée en considérant une rupture en traction de la couche située au niveau des interruptions des couches avoisinantes, par exemple dans la figure 1-23(a) les fibres juste cassées dans la zone rouge. En notant σ_{max} la contrainte à rupture en traction de la couche unidirectionnelle, les expressions suivantes sont obtenues :

$$\sigma_{max} = \frac{F_{6PN}}{e \times 3 \times L_1} \quad (2.1)$$

$$F_{6P6C-max} = \frac{1}{3} F_{6PN} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{max-6P6C} = \frac{F_{6P6C-max}}{e \times 3 \times L_1} = \frac{1}{3} \frac{F_{6PN}}{e \times 3 \times L_1} = \frac{1}{3} \sigma_{max} \quad (2.3)$$

Où e : Epaisseur de la couche ;

L1 : Largeur de la plaque composite ;

F_{6P6C-max} : Force maximale à rupture du joint à double recouvrement (réf 6P6C) ;

F_{6PN} : Force maximale à rupture des fibres de carbone continues (6PN) ;

σ_{max-6P6C} : Contrainte à rupture en traction du joint à double recouvrement (réf 6P6C).

Les résultats des essais en traction des plaques avec fibres de carbone continues (6PN) ont été récapitulés dans le tableau 1-6.

N° de l'éprouvette	Contrainte Max(MPa)	Contrainte Max Moyenne(MPa)
1	2020,1	2061,42
2	1989,2	
3	2210,3	
4	1967,6	
5	2039,5	
6	2141,8	

Tableau.1-6 Résultats des essais en traction de plaque avec fibres de carbone continues(6PN)

La contrainte à rupture en traction du joint à double recouvrement (réf 6P6C), dans l'hypothèse d'une rupture gouvernée par la rupture d'une couche, est calculée par $\sigma_{max-6P6C} = \frac{1}{3} \times 2061,42 = 687$ MPa.

L'évolution de la résistance des plaques avec joint à double recouvrement (réf 6P6C) en fonction de la longueur de recouvrement L_r est présentée sur la figure 1-26.

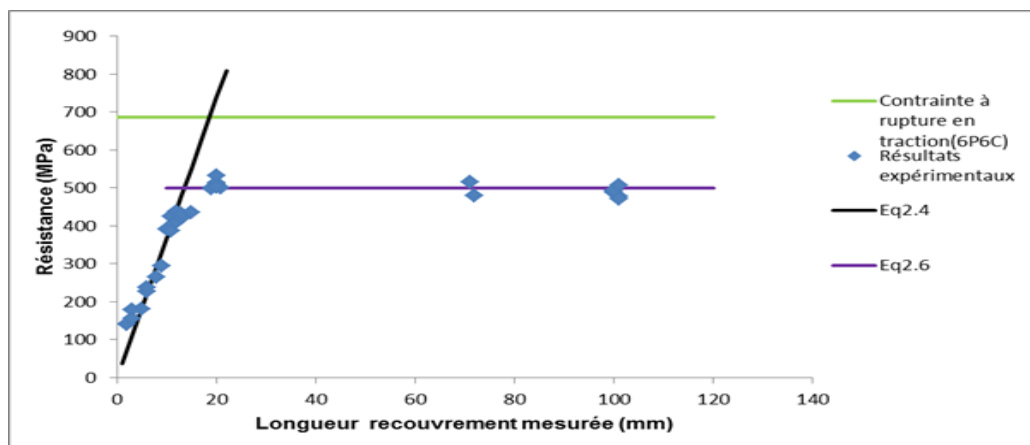


Figure1-26 Evolution de la résistance en traction en fonction de la longueur de recouvrement, joint à double recouvrement (réf 6P6C)

Il apparaît que lorsque la longueur de recouvrement augmente entre 2mm et 20mm, la contrainte maximale augmente entre 140 MPa et 510 MPa. Ensuite, lorsque la longueur de recouvrement est fixée à une valeur supérieure à 20mm, la résistance du composite avec joint à double recouvrement reste à une valeur constante de $\sigma_{max} = 500$ MPa. Nous en déduisons que la longueur de transfert de charge critique du modèle de double

recouvrement (6P6C) est $L_{tc} = 20\text{mm}$ et la résistance est égale à environ 500 MPa. Les courbes correspondant aux expressions Eq2.4 et Eq2.6 sont représentées et seront commentées dans le paragraphe suivant lorsque nous présenterons ces expressions. On remarque que dans ce cas, la rupture du composite est due à la rupture de l'interface, pour un niveau de contrainte inférieur à celui correspondant à la rupture en traction d'une couche.

3.1.4 Détermination de la contrainte à rupture de l'interface (τ_f) et de l'énergie de rupture (G_{IIC})

Le demi-modèle du joint à double recouvrement a été représenté pour simuler la rupture d'un composite à fibres discontinues (Figure 1-27). La valeur a représente une longueur d'interface fissurée.

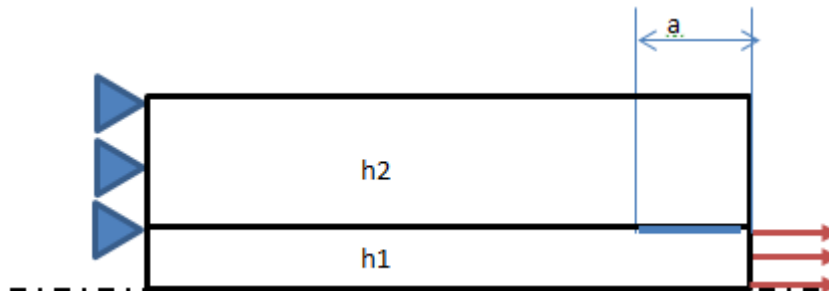


Figure1-27 Modèle simplifié de joint à double recouvrement
a représenté la zone endommagée

Pour une longueur de recouvrement faible ($L_r \ll$ longueur de transfert de charge), le niveau de cisaillement est uniforme dans l'interface. On a alors :

$$\sigma^r = \frac{\tau_f L_r}{(h_1 + h_2)} \quad (2.4)$$

Où σ^r est la contrainte à rupture du composite. On peut alors obtenir la valeur de la contrainte de cisaillement dans l'interface τ_f :

$$\tau_f = \frac{\sigma^r (h_1 + h_2)}{L_r} \quad (2.5)$$

Les dimensions h_1 et h_2 sont respectivement égales à 0,25mm et 0,5mm (figure1-25). Au cours des essais de traction sur les éprouvettes à double recouvrement (réf 6P6C), la contrainte à rupture $\sigma^r = 405\text{ MPa}$ a été mesurée avec $L_r = 11\text{mm}$ alors que la longueur de transfert de charge est $L_{tc} = 20\text{mm}$. Il est possible de calculer la contrainte de cisaillement à rupture de l'interface :

$$\tau_f = \frac{\sigma^r (h_1 + h_2)}{L_r} = \frac{405 \times (0,25 + 0,5)}{11} = 27,6375\text{ MPa}$$

Pour une longueur de recouvrement L_r importante, le taux de restitution d'énergie est déterminé en utilisant la même démarche que Michael R. Wisnom 1992 [M.R. Wisnom.,1992] :

$$G_{IIC} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma^r)^2 h_1 (h_1 + h_2)}{E h_2} \quad (2.6)$$

L'expression de la contrainte à rupture en traction est alors :

$$\sigma^r = \sqrt{\frac{2Eh_1 G_{IIC}}{h_2 (h_1 + h_2)}} \quad (2.7)$$

Lorsque l'épaisseur du pli devient faible devant celle du stratifié ($h_2 < h_1 + h_2$), cette relation tend asymptotiquement vers la relation proposée par [S. Pimenta et al., 2014].

Grâce aux essais de traction sur plaques à double recouvrement (éprouvettes réf 6P6C), la contrainte maximale a été mesurée à $\sigma^r = 500$ MPa lorsque la longueur recouvrement $L_r = L_{tc} = 20$ mm. L'énergie à rupture est obtenue par la relation :

$$G_{IIC} = \frac{(\sigma^r)^2 h_2 (h_1 + h_2)}{2Eh_1} = \frac{500^2 \times 0,5 \times (0,25 + 0,5)}{2 \times 120000 \times 0,25} = 1,56 \text{ KJ} / \text{m}^2$$

Les courbes correspondant aux expressions 2.4 et 2.6 ont été tracées sur la figure 1-24.

3.2 Simulation numérique du joint à double recouvrement

3.2.1 Géométrie du domaine

Un modèle numérique a été développé avec ABAQUS pour simuler le comportement d'un joint à double recouvrement (Figure 1-28) (essais référencés « 6P6C »). Le modèle numérique est un modèle à six fibres se recouvrant partiellement avec des interfaces représentant la résine entre les fibres : comme pour le modèle précédent, une fibre est composée de filaments UD et de résine. Chaque fibre possède une épaisseur $h = 0,25$ mm et l'épaisseur totale du modèle est 1,5 mm. La largeur (dans la direction perpendiculaire au plan) est notée $b = 20$ mm et la longueur totale du modèle est égale à 275 mm. La variable est la longueur de recouvrement L_r qui peut être fixée entre 5 mm et 105 mm.

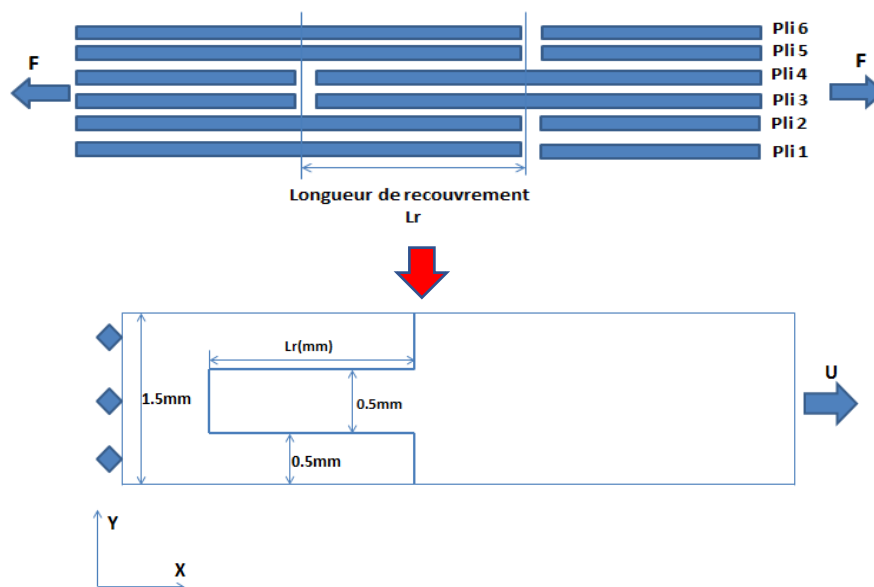


Figure 1-28 Modèle de simulation numérique de double recouvrement

Le maillage choisi est toujours de type 'Plan Strain-Linear-CPE4' et la taille des éléments est 0,1mm x 0,1mm ; il y a donc 15 éléments dans la hauteur de la fibre (figure1-29).

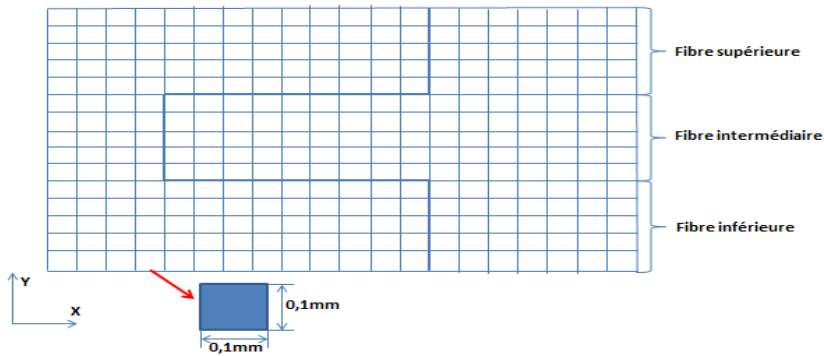


Figure1-29 Maillage utilisé pour le modèle de double recouvrement

3.2.2 Modèle numérique

Les deux interfaces endommageables sont modélisées dans Abaqus par 'Surface to Surface contact (Standard)'. Ces nœuds possèdent les propriétés de l'interface (figure 1-30).

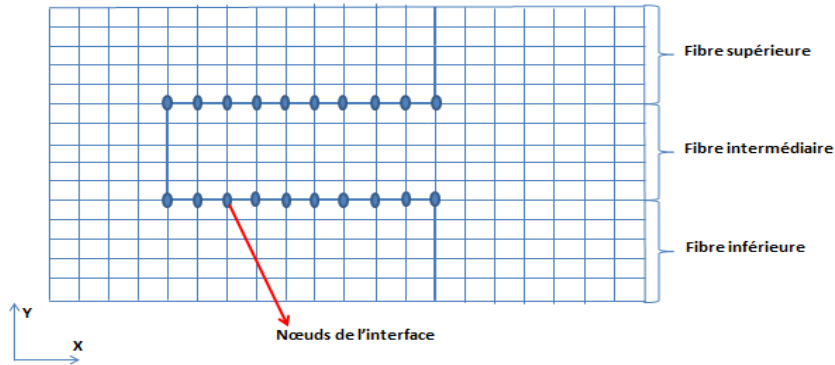


Figure1-30 Interface entre fibres discontinues

3 conditions aux limites ont été utilisées pour la simulation numérique :

- (CL1) Encastrement sur toute la hauteur de la frontière gauche ;
- (CL2) Déplacement nul sur Y sur toute la hauteur de la frontière droite ;
- (CL3) Déplacement en X imposé de 10mm sur toute la hauteur de la frontière droite.

Pour ce modèle, la largeur du domaine est égale à 20mm et la longueur de recouvrement L_r est variable de 5mm à 105mm.

Les propriétés des matériaux de l'interface (résine seule) et des "fibres" (filaments de carbone UD + résine) ont été regroupées dans les tableaux 1-7(a) et 1-7(b).

τ_0	τ_f	G_{Ic}	G_{IIc}	η	k
13 MPa	27,6 MPa	0,5 KJ/m ²	1,56 KJ/m ²	2	1,3e6 N/m

Tableau.1-7(a) Propriétés du matériau de l'interface (résine seule)

E_{11}	$E_{22}=E_{33}$	$G_{12}=G_{13}$	G_{23}	$\nu_{12}=\nu_{13}$	ν_{23}
120 GPa	10,5 GPa	5,25 GPa	3,48 GPa	0,3	0,5

Tableau.1-7(b) Propriétés du matériau des "fibres" (filaments carbone UD + résine)

Les résultats, (contrainte, déformation) sont relevés sur tous les nœuds de la frontière droite du domaine (modèle de double recouvrement) (Figure1-31).

Pour l'étude de l'influence du maillage nous avons fixé $L_r=40\text{mm}$ et nous avons fait varier le nombre d'éléments (figure 1-31). Les résultats montrent clairement qu'à partir de 2 éléments par mm, la contrainte maximale calculée n'évolue plus quand on augmente ce nombre d'éléments par mm. Pour les simulations ultérieures, nous avons choisi la valeur de 10 éléments par mm (longueur de maille=0,1mm) sachant que ce choix n'est pas très pénalisant en termes de temps de calcul.

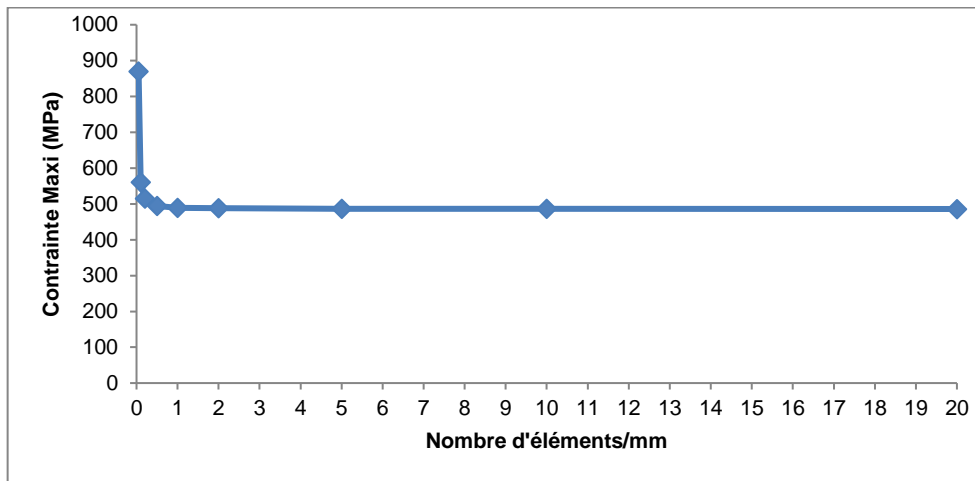


Figure1-31 Influence de la taille des éléments finis ($L_r=40\text{mm}$)

3.2.3 Simulations numériques

Nous imposons au déplacement de varier entre 0 et 10 mm. Nous avons calculé l'évolution de la force F suivant la direction X en fonction de la longueur de recouvrement L_r (Tableau.1-8). La section totale d'un composite étant $S=30\text{mm}^2$, la résistance du composite dans le modèle de double recouvrement est alors $\sigma = F/S$ (Tableau.1-8).

Longueur de recouvrement L_r (mm)	Force maximale F_{\max} (N)	Déplacement U_{\max} (mm)	Contrainte maximale σ_{\max} (MPa)
5	5425	0,4	180,8
11	11082	0,9	396,4
20	14608,4	1,2	487
40	14598	1,2	487
75	14664	1,2	488,81
105	14624,2	1,2	487

Tableau.1-8 Résultats de simulation numérique

Il apparaît que, en faisant varier la longueur de recouvrement de 5mm à 20mm, la force maximale supportée par le composite augmente de 5425N à 14608N. Ensuite, pour une longueur de recouvrement supérieure à 20mm, la force maximale supportée reste constante et égale à environ à 14608N.

La courbe de la contrainte maximale en fonction de la longueur recouvrement est tracée sur la figure 1-32.

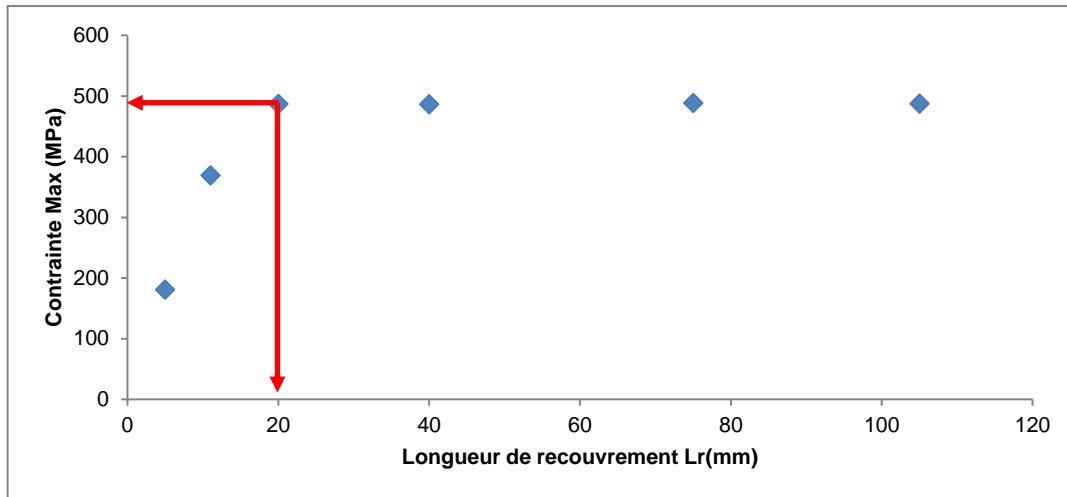


Figure1-32 Résultats de la simulation numérique Abaqus sur la contrainte maximale en fonction de la longueur recouvrement (modèle de double recouvrement)

Comme nous l'avons constaté pour les résultats expérimentaux, la résistance du composite augmente d'abord avec la longueur de recouvrement L_r , ensuite, pour des longueurs de recouvrement supérieures à une valeur L_r critique d'environ 20mm, la contrainte maximale supportée par le composite reste constante à une valeur maximale σ_{max} . L_r critique représente donc la longueur maximale de transfert de charge entre deux fibres se recouvrant partiellement. Nous l'appellerons L_{tc} .

3.2.4 Etude du cisaillement le long de l'interface

Pour l'étude du cisaillement le long de l'interface, la simulation utilise le modèle de joint à double recouvrement avec une longueur recouvrement $L_r=75\text{mm}$ ($L_r > L_{tc}$). Les résultats de la contrainte en fonction de la longueur de recouvrement sont représentés sur la figure 1-33. Les états de cisaillement et d'endommagement ont été représentés à trois instants : T1, T2 et T3.

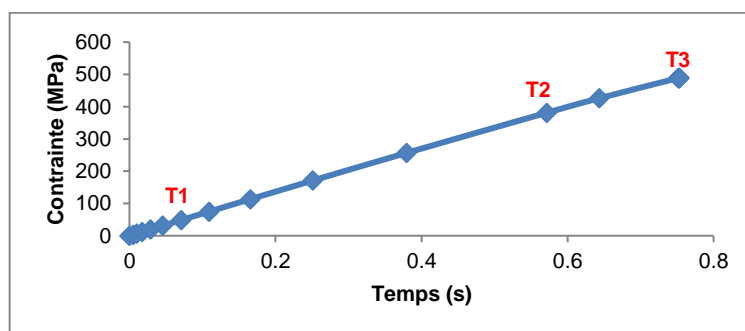


Figure1-33 (a) Résultat de la simulation de la contrainte totale supportée par le composite en fonction de la longueur de recouvrement

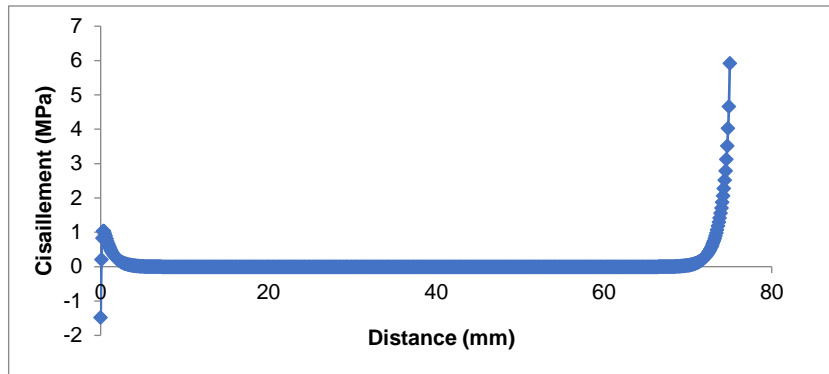


Figure 1-33 (b) Etat de contrainte le long de l'interface à l'instant T1

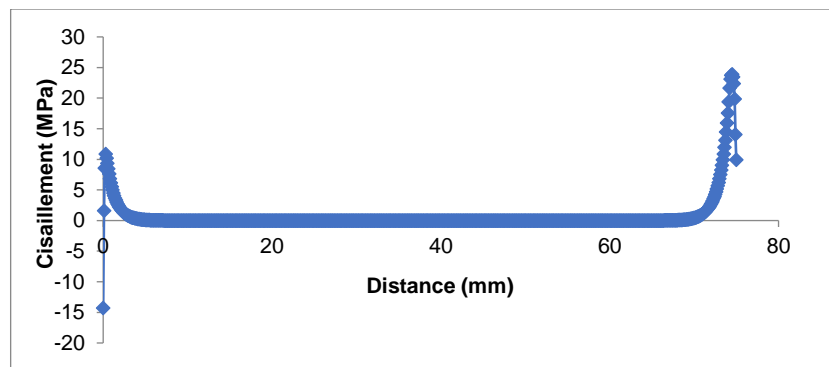


Figure 1-33 (c) Etat de contrainte le long de l'interface à l'instant T2

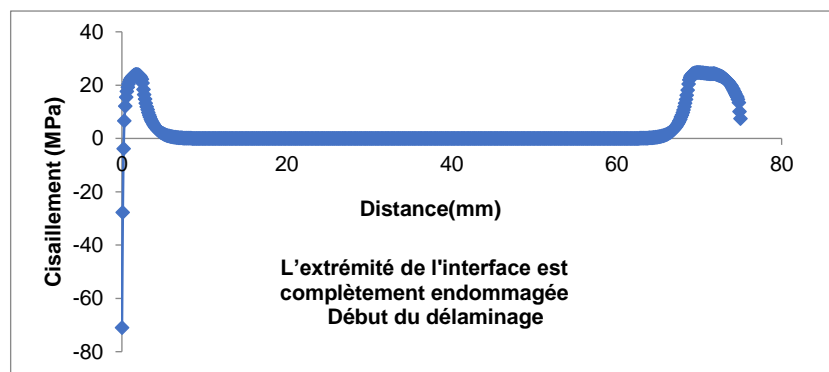


Figure 1-33 (d) Etat de contrainte le long de l'interface à l'instant T3

Les figures 1-33(b-d) montrent que :

- à l'instant T1, l'interface est entièrement dans le domaine élastique ;
- à l'instant T2, une partie de l'interface commence à s'endommager ;
- à l'instant T3, l'extrémité de l'interface est complètement endommagée et une fissure se propage dans l'interface, ce qui marque le début du délaminage.

3.3 Comparaison des résultats numériques et des essais expérimentaux sur le joint à double recouvrement

Pour ces simulations numériques, nous avons fait varier la longueur de recouvrement L_r de 5mm à 105mm ; le déplacement imposé $U_{max}=10\text{mm}$. La courbe de la résistance totale en

fonction de la longueur de recouvrement obtenue par simulation numérique est comparée aux résultats expérimentaux (réf 6P6C) (figure 1-34).

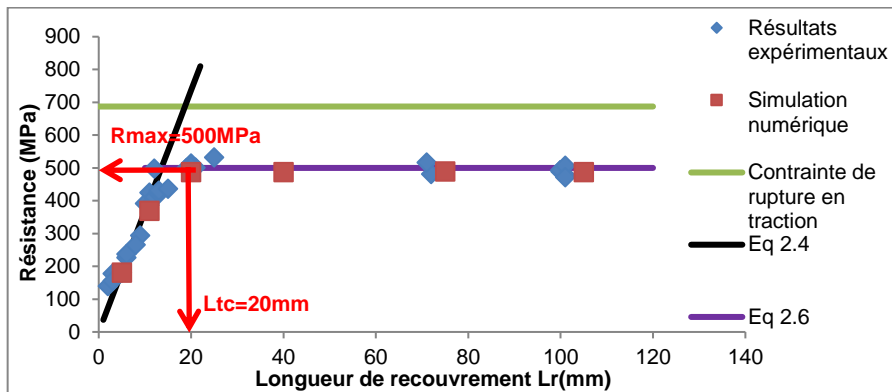


Figure1-34 Courbes résistance / longueur de recouvrement ; résultats numériques et expérimentaux

Les paramètres identifiés $G_{IIC} = 1,56 \text{ KJ/m}^2$ et $\tau_f = 27,6 \text{ MPa}$ (voir expressions au paragraphe 3.1.4) permettent de simuler très correctement le comportement d'un joint à double recouvrement avec le modèle numérique. Sur les résultats de la figure 1-32, il apparaît en effet que les résultats de la simulation numérique sont très proches des résultats expérimentaux. Nous en déduisons que pour un joint à double recouvrement carbone (ensimé) / époxy, la longueur de transfert de charge (L_{tc}) est égale à 20mm et la résistance R_{max} est égale à 500 MPa.

Le modèle numérique étant maintenant validé, nous allons l'exploiter pour étudier l'influence de certains paramètres sur les performances des joints à double recouvrement.

3.4 Etude de l'influence des paramètres sur la résistance du joint à double recouvrement

Pour les simulations numériques de ce paragraphe, nous devons choisir une longueur de recouvrement supérieure à la longueur de transfert de charge soit 20mm. Nous avons choisi une longueur de recouvrement (L_r) égale à 75mm.

3.4.1 Influence de l'énergie de rupture (G_{IIC})

Nous avons fait varier l'énergie à rupture (G_{IIC}) de $1,56 \text{ KJ/m}^2$ à $2,5 \text{ KJ/m}^2$. La contrainte de cisaillement à rupture de l'interface (τ_f) est fixée à 27,6 MPa. Les résultats sont regroupés dans le tableau 1-9.

G_{IIC} (KJ/m ²)	R_{max} (MPa)
1	388,07
1,56	488,8
2	553,67
2,5	620,99

Tableau.1-9 Influence de l'énergie à rupture(G_{IIC}) sur la résistance du joint à double recouvrement

Il apparaît que, quand G_{IIC} varie de $1,56 \text{ KJ/m}^2$ à $2,5 \text{ KJ/m}^2$, la résistance maximale R_{max} augmente de 489 MPa à 621 MPa, ce qui montre l'importance de ce paramètre.

3.4.2 Influence de la contrainte de cisaillement maximale de l'interface (τ_f)

Nous avons fait varier la contrainte de cisaillement maximale de l'interface (τ_f) de 10 MPa à 40 MPa. L'énergie de rupture de l'interface (G_{IIC}) est fixée à 1,56 KJ/m². Les résultats sont regroupés dans le tableau 1-10.

τ_f (MPa)	Rmax (MPa)
10	496
15	494
25	488
27,6	489
30	487
40	474

Tableau.1-10 Influence de la contrainte de cisaillement maxi de l'interface (τ_i) sur la résistance maximale du joint à double recouvrement

Il apparaît que la variation de la contrainte de cisaillement maximale de l'interface (τ_f) entre 10 et 40 MPa a peu d'influence sur la résistance maximale du composite Rmax ~ 475 / 495 MPa, ce qui confirme le résultat obtenu avec l'étude sur le joint à simple recouvrement.

4. Modélisation de la résistance d'un joint à simple recouvrement

Après avoir déterminé les principales propriétés de l'interface grâce au modèle de joint à double recouvrement, le modèle de joint à simple recouvrement est utilisé pour simuler la résistance d'un simple recouvrement (asymétrique) entre fibres.

4.1 Simulation numérique du joint à simple recouvrement

4.1.1 Modèle numérique

Le domaine de simulation numérique du joint à simple recouvrement est un modèle à quatre fibres se recouvrant partiellement avec une interface représentant la résine entre les fibres (figure1-35). Une fibre est un mélange de filaments UD de carbone + résine. Chaque fibre possède une épaisseur $h=0,25\text{mm}$ et l'épaisseur totale du modèle est de 1mm, l'interface n'a pas d'épaisseur. La largeur (dans la direction perpendiculaire au plan) est notée $b=20\text{mm}$ et la longueur totale du modèle est égale 275mm. Le paramètre L_r est variable (de 5 à 60mm).

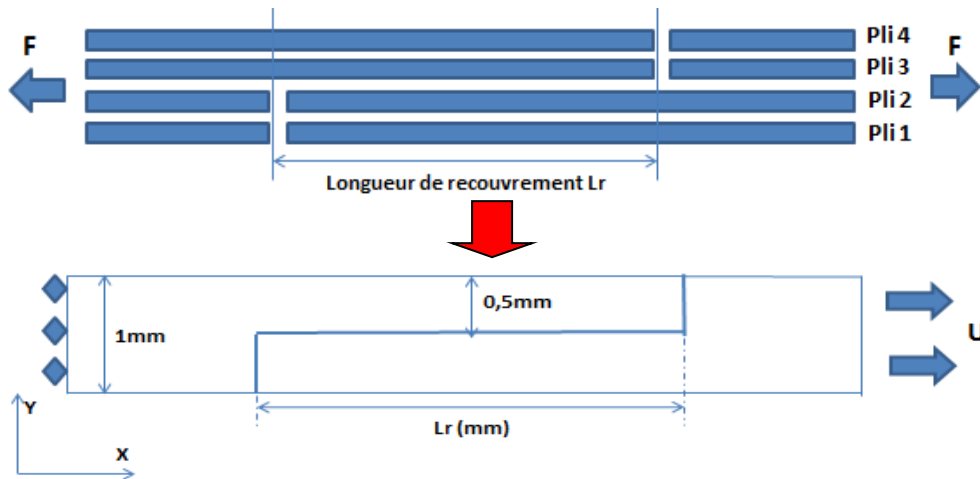


Figure1- 35 Domaine modélisé pour un joint à simple recouvrement

Le maillage et la gestion de l'interface sont traités de la même façon qu'avec le modèle présenté au paragraphe 2. La taille des éléments est de 0,1mm x 0,1mm.

Trois conditions aux limites ont été utilisées :

- (CL1) Encastrement sur toute la frontière gauche ;
- (CL2) Déplacement sur $Y=0$ sur toute la frontière droite ;
- (CL3) Déplacement en $X=10\text{mm}$ sur toute la frontière droite.

4.1.2 Résultats des simulations numériques

Pour toutes les simulations numériques, le déplacement imposé est $U_{\max}=10\text{mm}$. Les résultats des simulations numériques sur la force maximale en fonction de la longueur de recouvrement L_r sont rassemblés dans le tableau 1-11. La section du composite étant $S=20\text{mm}^2$, la résistance du composite dans le modèle de joint peut être calculée (Tableau 1-10).

Longueur de recouvrement L_r (mm)	Force maximale F_{\max} (N)	Déplacement U_1 (mm)	Contrainte maximale σ_{\max} (MPa)
5	2304	0,3	115
10	4703	0,6	235
15	7012	0,9	351
20	8953	1,1	448
25	10391	1,3	520
30	11204	1,4	560
35	11398	1,4	570
36	11432	1,4	571
40	11529	1,4	576
50	11500	1,4	575
60	11474	1,4	574

Tableau.1-11 Résultats des simulations numériques

Il apparaît que, pour des valeurs de longueur de recouvrement de 5mm à 30mm, la force maximale supportée par le composite augmente de 2304N à 11204N. Ensuite, pour des valeurs de la longueur de recouvrement supérieures à 30mm, la force maximale supportée par le joint reste constante et égale environ à 11204N.

L'évolution de la contrainte maximale en fonction de la longueur de recouvrement est tracée sur figure 1-36.

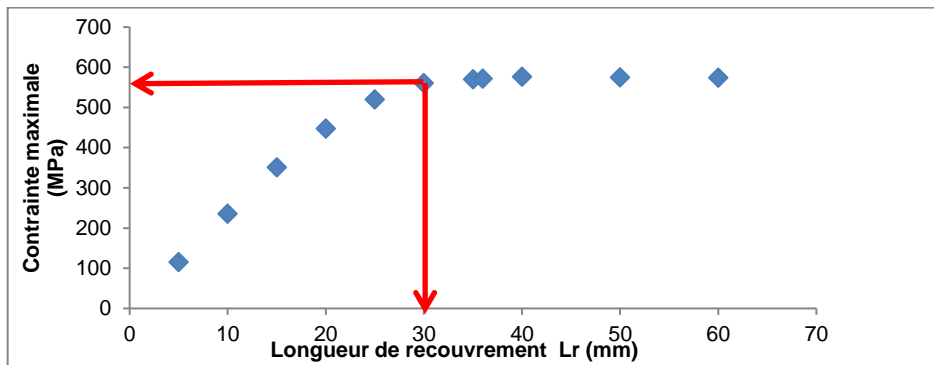


Figure1-36 Contrainte maximale en fonction de la longueur de recouvrement Lr (simulation numérique du modèle de simple revouvrement carbone/époxy)

Il apparaît que la résistance du composite augmente d'abord avec la longueur de recouvrement Lr, ensuite, lorsque la longueur de recouvrement dépasse une valeur Lr critique d'environ 30mm, la contrainte maximale supportée par le composite reste constante à une valeur maximale σ_{max} .

4.2 Essais expérimentaux de simple recouvrement (essais réf 4P4C)

4.2.1 Mise en œuvre de plaques composites avec fibres de carbone discontinues

Les éprouvettes sont constituées d'un stratifié de plis unidirectionnels (UD) avec fibres orientées dans la direction de la charge (Figure1-37). Afin d'étudier l'effet de la longueur de recouvrement entre fibres sur la résistance du composite, 9 plaques avec différentes longueurs de recouvrement ont été réalisées. Nous avons choisi des valeurs de Lr de 5mm à 70mm.

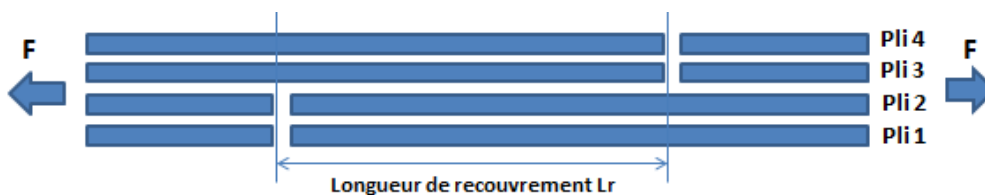


Figure1-37 Schéma des éprouvettes à simple recouvrement (réf 4P4C)

Les fibres utilisées sont des Hexforce® 48300 unidirectionnelles (UD). Chaque pli est déposé dans le moule 150mm×280mm et enduit de résine LY5052. Puis le moule est fermé et mis dans la presse à plateaux chauffants à la température T=40°C. Les cyclages de pression et de température en fonction du temps sont les mêmes que ceux représentés sur la figure1-20. Les caractéristiques des plaques composites à simple recouvrement sont représentées dans le tableau 1-12. La longueur de recouvrement réellement obtenue est mesurée après rupture de l'éprouvette.

N° de plaque	Longueur de recouvrement théorique L_{RT} (mm)	Longueur de recouvrement mesurée L_{RM} (mm)	Masse de carbone (g)	Masse de la plaque (g)	Taux massique de fibres(%)
4P4C5	5	5-5-5-5-6	52	82	63,41
4P4C12	12	11-11-12-11-11-12	52	82	63,41
4P4C15	15	19-20-20-19-19-20	51	72	70,83
4P4C20	20	20-20-20-20-21-21	50	75	66,67
4P4C25	25	24-24-25-24-25-24	51	84	60,71
4P4C30	30	25,3-28-29-29-27-26	50	77	64,93
4P4C35	35	35-35-34-34-35-35	50	77	64,93
4P4C45	45	45-45-45-45-45-45	54	78	69,23
4P4C70	70	68-70-70-69-71-70	49	82	75

Tableau.1-12 Caractéristiques des plaques à simple recouvrement

Après la fabrication des plaques, des talons verre- époxy sont collés aux extrémités. Chaque plaque est découpée en 6 éprouvettes comme expliqué au paragraphe 3.1.2.

4.2.2 Calcul de la contrainte à rupture en traction supportée par un joint à simple recouvrement

La contrainte maximale à rupture d'une plaque composite constituée de fibres de carbone continues a été mesurée à partir d'essais de traction : $\sigma_{max} = 2061,42$ MPa. Dans l'hypothèse d'une ruine gouvernée par la rupture en traction d'une couche, la contrainte à rupture en traction du joint à simple recouvrement serait $\sigma_{max-4PC} = \frac{1}{2} \times 2061,42 = 1030,71$ MPa (Figure1-38).

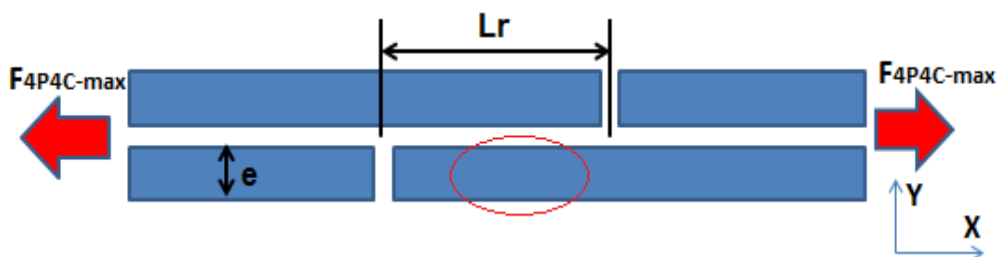


Figure1-38 Architecture simple d'une plaque avec joint à simple recouvrement (2 couches = 4 plis)

4.3 Comparaison des résultats du modèle ABAQUS de simple recouvrement / modèle expérimental (réf 4P4C)

Les valeurs de résistance en fonction de la longueur de recouvrement mesurée sont présentées sur la figure 1-39. On remarque que la longueur de recouvrement L_r a une influence sur la résistance du joint à simple recouvrement. Lorsque L_r prend une valeur de 5 à 30mm, la résistance maximale moyenne augmente de 103 MPa à 560 MPa. Ensuite lorsque la longueur de recouvrement prend une valeur supérieure à la valeur critique (ici $L_{tc} = 30$ mm), la contrainte maximale reste constante $\sigma_{max} = 560$ MPa environ.

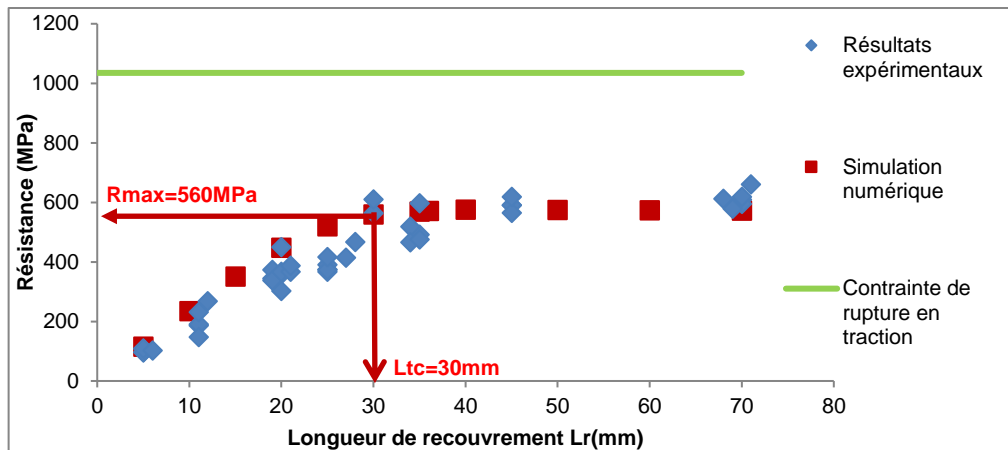


Figure1-39 Evolution de la résistance avec la longueur de recouvrement, joint à simple recouvrement

On note une bonne corrélation entre les résultats de la simulation numérique et les résultats expérimentaux. Pour le modèle de joint à simple recouvrement carbone (ensimé)/époxy : la longueur de transfert de charge est estimée à $L_{tc} = 30\text{mm}$ et la résistance $R_{max} = 560\text{MPa}$. Là encore, le niveau de contrainte à rupture du joint à simple recouvrement est inférieur au niveau de contrainte que l'on pourrait atteindre dans le cas de la rupture d'une couche en traction.

5. Conclusions et récapitulatif du comportement mécanique d'un recouvrement partiel entre deux fibres

Un composite à fibres de carbone recyclées est un composite à fibres discontinues. Pour modéliser son comportement mécanique, un modèle numérique a été développé pour simuler le transfert de charge entre deux fibres se recouvrant partiellement.

Tout d'abord un premier modèle numérique a permis de simuler un simple recouvrement. Ce modèle a été validé en comparaison avec la solution analytique de Yuan [H. Yuan al., 2004].

Dans la deuxième partie, le modèle a été modifié pour simuler le comportement d'un joint à double recouvrement. En effet, dans cette configuration, la symétrie permet de n'avoir qu'une sollicitation du joint en cisaillement pur. La comparaison entre la simulation numérique et les essais expérimentaux a permis d'identifier les caractéristiques mécaniques de l'interface époxy entre fibres de carbone (ensimées) : $G_{IIC} = 1,56\text{KJ/m}^2$ et $\tau_f = 27,6\text{MPa}$.

Ensuite le modèle numérique Abaqus a été utilisé pour analyser l'influence des paramètres sur la résistance du joint du double recouvrement (avec la longueur de recouvrement $L_r = 75\text{mm}$). Les résultats démontrent que la contrainte de cisaillement maximale de l'interface τ_f a peu d'influence sur la résistance maximale du composite alors que l'énergie de rupture de l'interface G_{IIC} a une grande influence sur celle-ci.

Il a ainsi été montré que seul G_{IIC} avait une influence sur la résistance du composite à fibres discontinues. En conséquence, la réalisation de matériaux composites à fibres recyclées très résistants passe par l'utilisation d'une matrice (thermoplastique) qui possède un G_{IIC} supérieur à $1,56\text{KJ/m}^2$.

Dans la troisième partie du chapitre 1, le modèle numérique a été utilisé pour simuler le comportement d'un joint à simple recouvrement avec les caractéristiques des fibres de carbone (ensimées) et de la résine époxy. Les résultats de la simulation numérique et les résultats expérimentaux sont aussi en bonne adéquation et nous avons pu valider les valeurs des paramètres G_{IIC} et τ_f pour le composite de fibres de carbone (ensimées) / résine époxy.

Dans le chapitre suivant, nous exploiterons les modèles que nous venons de mettre en place pour simuler différents types de recouvrement. Nous développerons en particulier un modèle de joint en «escalier» pour comprendre l'influence de l'architecture fibreuse discontinue sur la résistance du composite.

Chapitre 2 : Modélisation d'un composite avec différentes longueurs de recouvrement

1. Introduction : Mettre en évidence l'influence de l'architecture sur la rupture d'un composite à fibres recyclées

Les composites à fibres recyclées sont constitués de fibres discontinues et ils contiennent différentes longueurs de recouvrement (figure 2-1). Le comportement mécanique dépend du transfert de charge entre deux fibres. Dans le premier chapitre, nous avons modélisé le comportement de l'interface entre deux fibres par le modèle du joint à simple recouvrement et le modèle du joint à double recouvrement pour valider les modèles numériques et identifier les propriétés de l'interface constituée de résine époxy. Ensuite, nous allons adapter et utiliser le modèle Abaqus pour mettre en évidence l'influence de l'architecture sur la rupture d'un composite à fibres recyclées. Le modèle numérique appelé joints en «escalier» a permis de simuler des longueurs de recouvrement disposées de façon asymétrique et le modèle numérique appelé joints en «emboîtement» a permis de simuler des longueurs de recouvrement disposées de façon symétrique (figure 2.1).

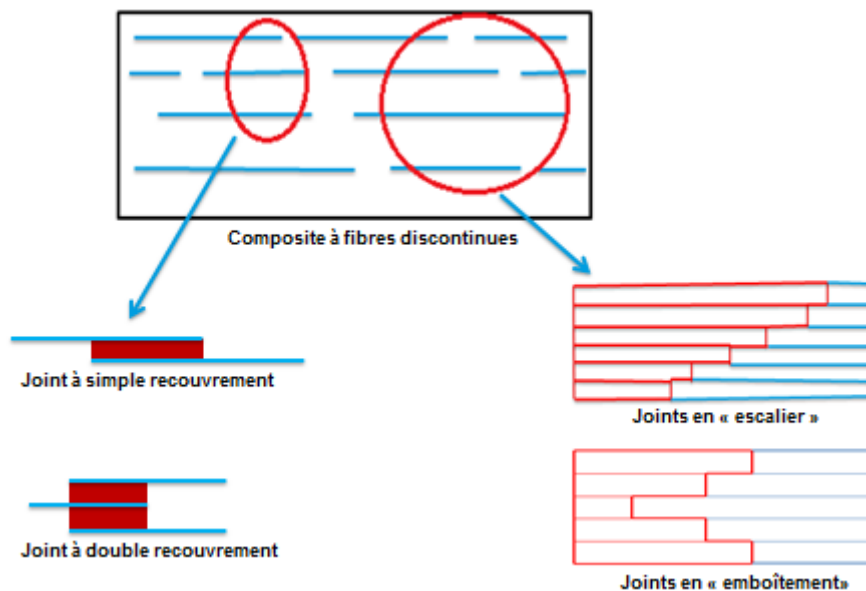


Figure2-1 Schéma de l'architecture idéalisée d'un composite à fibres recyclées

2. Modélisation de la résistance des joints en «escalier»

2.1 Simulation numérique des joints en «escalier»

2.1.1 Modèle numérique

L'objectif recherché avec le modèle de joint en «escalier» est de simuler un composite avec différentes longueurs de recouvrement disposées de façon asymétrique. Le composite en «escalier» est constitué de 6 plis de fibres se recouvrant partiellement avec une interface représentant la résine entre les fibres (figure 2-2). Nous notons L_i ($1 \leq i \leq 5$) les 5 longueurs de recouvrement. Comme dans l'étude précédente, une fibre est un mélange de filaments UD de carbone + résine. Chaque fibre possède une épaisseur $h=0,25\text{mm}$ et l'épaisseur totale du modèle est de $1,5\text{mm}$, l'interface n'a pas d'épaisseur. La largeur (dans la direction perpendiculaire au plan) est notée $b=20\text{mm}$ et la longueur totale du modèle est de 180mm .

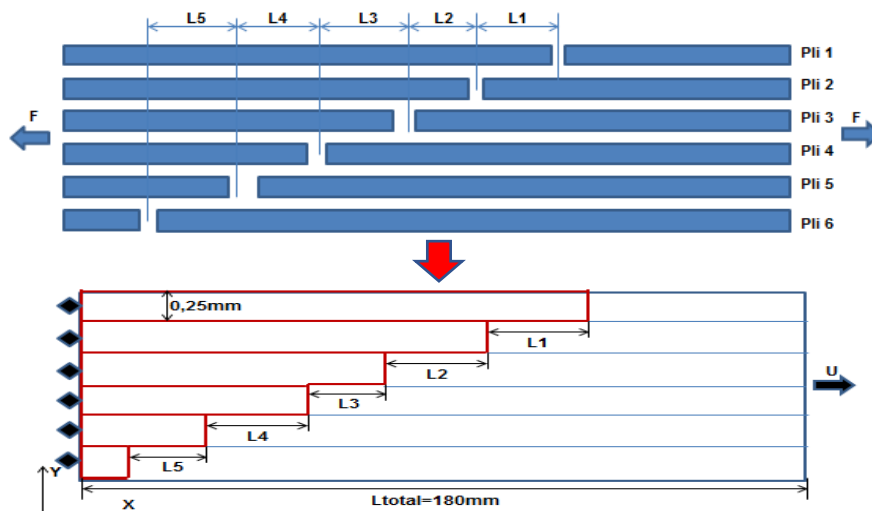


Figure 2-2 Domaine modélisé pour des joints en «escalier»

Le maillage et la gestion de l'interface sont traités de la même façon qu'avec le modèle présenté au paragraphe 2 du chapitre 1. La taille des éléments est de 0,1mm x 0,1mm.

Les conditions aux limites du modèle sont :

- (CL1) Encastrement sur toute la frontière gauche ;
- (CL2) Déplacement sur $Y=0$ sur toute la frontière droite ;
- (CL3) Déplacement en $X=10\text{mm}$ sur toute la frontière droite.

Dans un premier temps, nous déterminerons la longueur critique dans cette configuration puis nous étudierons l'effet du positionnement de longueurs de recouvrement (petites et grandes tailles) à l'intérieur du composite.

2.1.2 Détermination de la longueur de transfert de charge du modèle en «escalier»

Pour identifier la longueur de transfert de charge critique (L_{tc}), nous étudions la configuration où toutes les longueurs L_i sont égales à une unique valeur L_r . On a fait varier L_r de 5 mm à 40mm (figure 2-3).

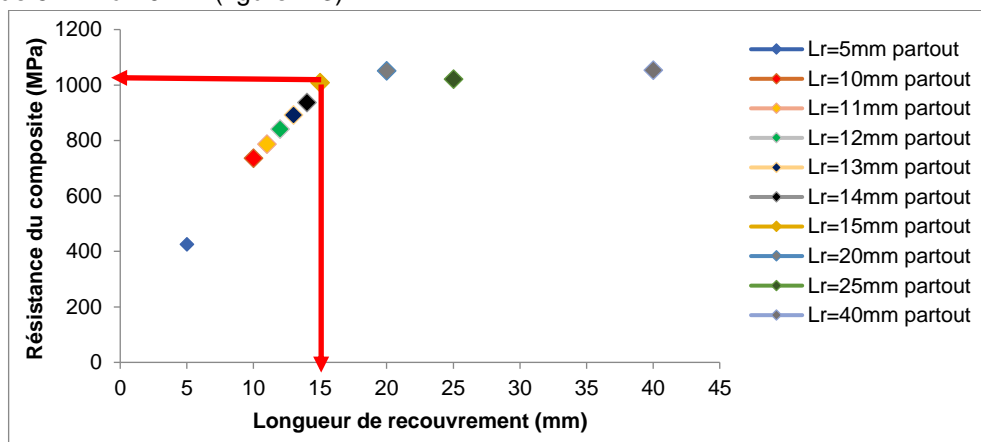


Figure 2-3 Evolution de la résistance avec la longueur de recouvrement (joints en «escalier»)

On remarque que, de 5mm à 15mm, la longueur de recouvrement L_r a une influence sur la résistance des joints en «escalier» (figure 2-3). En effet, la résistance du composite

augmente de 426 MPa à 1009 MPa. Ensuite, lorsque la longueur de recouvrement prend une valeur supérieure à 15 mm, la résistance du composite reste constante, $\sigma_{\max} = 1009$ MPa environ. On estime donc la longueur de transfert de charge L_{tc} à 15mm.

2.1.3 Résultats des simulations numériques avec $L_r = 5\text{mm}$ ou $L_r = 25\text{mm}$

On a utilisé 2 longueurs de recouvrement différentes : une longueur de recouvrement faible, $L_r=5\text{mm}$, et une grande longueur de recouvrement, $L_r=25\text{mm}$. Au total, nous avons simulé 11 géométries différentes que nous allons décrire.

Pour le modèle N°1 les 5 longueurs de recouvrement sont égales à 25mm et la longueur de recouvrement totale est donc $L_{r \text{ totale}} = 125\text{mm}$ (figure 2-3(a)). Pour le modèle N°2, les 5 longueurs de recouvrement sont égales à 5mm et la longueur de recouvrement totale est donc $L_{r \text{ totale}} = 25\text{mm}$ (figure 2-3(b)). Les simulations numériques montrent que la résistance du composite du modèle N°1 est égale à $R_{\max} = 1022$ MPa et celle du modèle N°2 à $R_{\min} = 426$ MPa. On en déduit donc que plus L_r est grand, plus R_{\max} est élevé.

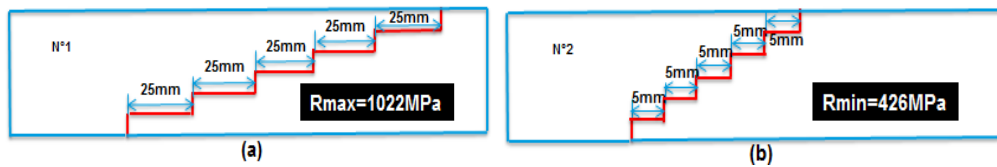


Figure2-3 Schéma du modèle des joints en «escalier» . (a) $L_r=25\text{mm}$ partout ; (b) $L_r=5\text{mm}$ partout

Dans le modèle N°3 un défaut a été positionné au centre et la longueur de recouvrement totale est $L_{r \text{ totale}} = 105\text{mm}$ (figure 2-3(c)) alors que dans le modèle N°4 un défaut a été positionné au bord, la longueur de recouvrement totale restant identique à $L_{r \text{ totale}} = 105\text{mm}$ (figure 2-3(d)). Si la résistance d'un composite du modèle N°3 (1018 MPa) est très proche de R_{\max} , celle d'un composite du modèle N°4 (648 MPa) est beaucoup plus faible que R_{\max} . Il apparaît donc qu'un défaut au centre du composite ne fait pas chuter la résistance à la différence d'un défaut au bord.

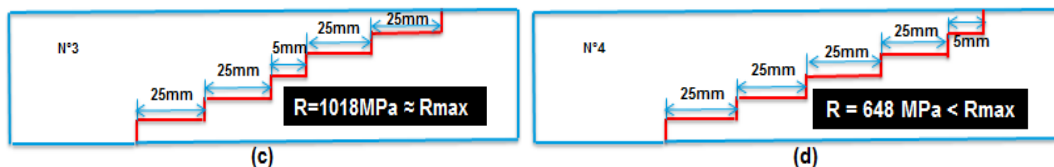


Figure2-3 Schéma du modèle des joints en «escalier» . (c) Un défaut à cœur ; (d) Un défaut au bord

Dans le modèle N°5, 2 défauts ont été positionnés à cœur de manière symétrique et « éloignés » l'un de l'autre (figure 2-3(e)), ces 2 défauts étant positionnés sur les bords dans le modèle N°6 (figure 2-3(f)).

Dans les modèles N°7 et 8, les défauts ne sont plus positionnés de façon symétrique : le modèle N°7 a des défauts à cœur (figure 2-3(g)) et le modèle N°8 sur un bord (figure 2-3(h)). La longueur de recouvrement totale pour ces 4 derniers modèles est la même, $L_{r \text{ totale}} = 85\text{mm}$. Les simulations numériques avec ces 4 modèles permettent d'étudier l'influence de la position des défauts sur la résistance du composite. La résistance d'un composite du modèle N°5 est égale 1011 MPa, très proche de R_{\max} , alors que la résistance d'un composite des modèles N°6 et N°7 sont égales respectivement à 646 MPa et 794 MPa, valeurs plus faibles que R_{\max} . De plus, la résistance d'un composite du modèle N°8 est égale à 479 MPa, très proche de R_{\min} .

En résumé, on observe donc que 2 défauts à cœur ("éloignés" l'un de l'autre et symétriques) ne font pas chuter la résistance alors que 2 défauts en peau et adjacents font fortement chuter la résistance du composite. Par ailleurs, 2 défauts sur les bords ou 2 défauts à cœur et proches font chuter la résistance du composite.



Figure2-3 Schéma du modèle des joints en «escalier» . (e) 2 défauts à cœur "éloignés" l'un de l'autre et symétriques ; (f) 2 défauts sur les bords ; (g) 2 défauts à cœur et adjacents ; (h) 2 défauts en peau et adjacents

Pour le modèle N°9, 3 défauts ont été répartis symétriquement (figure 2-3(i)) alors que pour le modèle N°10 les 3 défauts sont en peau et proches (figure 2-3(j)). Enfin, pour le modèle N°11 les 3 défauts sont à cœur et proches (figure 2-3(k)). Pour ces 3 derniers modèles permet d'étudier l'influence de la position des trois défauts sur la résistance du composite.

La résistance d'un composite du modèle N°9 est égale 646 MPa et la résistance d'un composite du modèle N°11 est égale 589 MPa, plus faibles donc que R_{max} alors que la résistance d'un composite du modèle N°10 est égale à 451 MPa, très proche de R_{min} . Il apparaît donc que 3 défauts positionnées asymétriquement font fortement chuter la résistance du composite, alors que 3 défauts répartis symétriquement et positionnés à cœur font chuter la résistance du composite moins fortement.

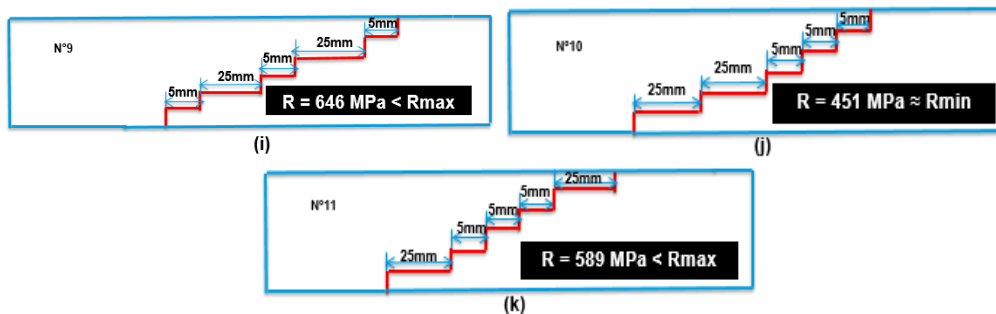


Figure2-3 Schéma du modèle des joints en «escalier» . (i) 3 défauts répartis symétriquement ; (j) 3 défauts en peau et proches ; (k) 3 défauts à cœur et proches

Les résultats des simulations numériques des 11 modèles en «escalier» sont rassemblés dans le tableau 2-1.

N° du modèle	Longueur de recouvrement L _r (mm)	Longueur de recouvrement totale L _{r-Totale} (mm)	Contrainte maxi calculée (MPa)
1	25-25-25-25-25	125	1022
2	5-5-5-5-5	25	426
3	25-25-5-25-25	105	1018
4	25-25-25-25-5	105	648
5	25-5-25-5-25	85	1011
6	5-25-25-25-5	85	646
7	25-25-5-5-25	85	794
8	25-25-25-5-5	85	479
9	5-25-5-25-5	65	637
10	25-25-5-5-5	65	451
11	25-5-5-5-25	65	589

Tableau 2-1 Résultats du modèle ABAQUS de joint en «escalier»

La résistance du modèle N°1 est égale à la résistance maximale d'un composite (R_{max}=1022 MPa) et la résistance du modèle N°2 est égale à la résistance minimale (R_{min}=426 MPa), c'est-à-dire que plus L_r est grand, plus R_{max} est grand.

La position du défaut et le nombre de défauts influent sur la résistance des joints en «escalier». La figure 2-4 regroupe les résultats de façon synthétique, la ligne rouge sur les schémas représentant le défaut (L_r=5mm). 1 défaut à cœur ou 2 défauts à cœur ("éloignés" et symétriques) sont tolérables sans baisse significative de la résistance du composite (figure 2-4(a)).

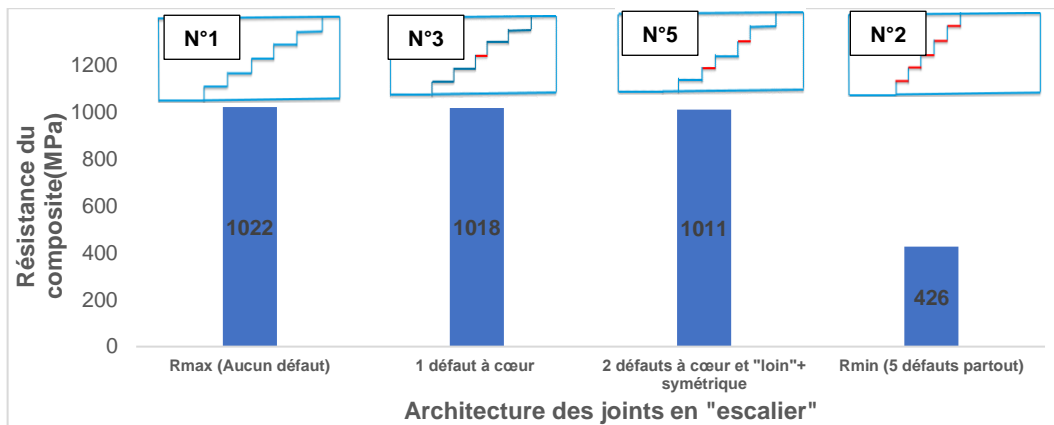


Figure2-4(a) Résistance du composite pour les modèles 1, 2, 3 et 5

1 défaut en peau, 2 défauts sur les bords, 2 défauts à cœur et proches, 3 défauts répartis symétriquement ou 3 défauts à cœur et proches font fortement chuter la résistance du composite (figure2-4(b)).

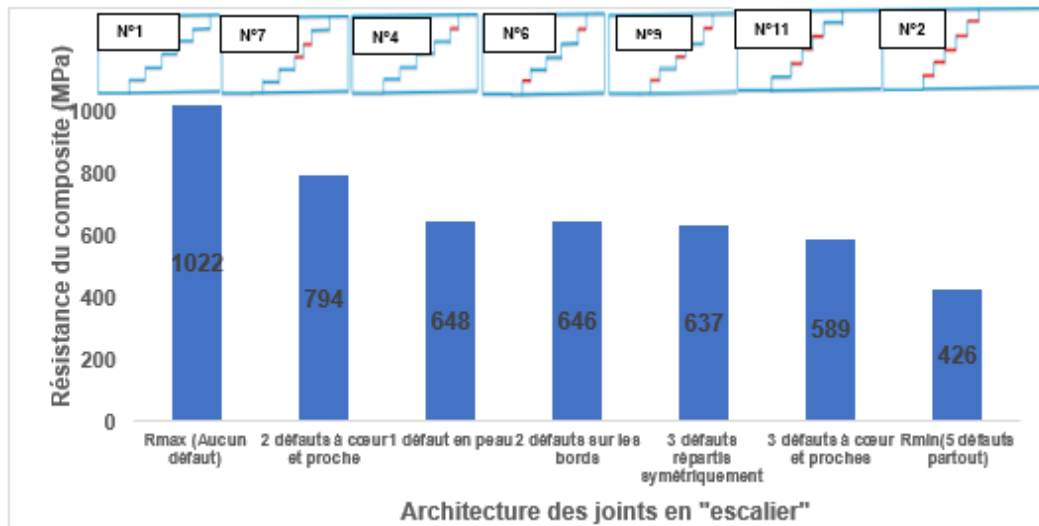


Figure2-4(b) Résistance du composite pour les modèles 1, 2, 4, 6, 7, 9 et 11

2 défauts en peau (proches + asymétriques) ou 3 défauts en peau (proches + asymétriques) sont équivalents, en termes de résistance, à un matériau entièrement composé de défauts (figure 2-4(c)).

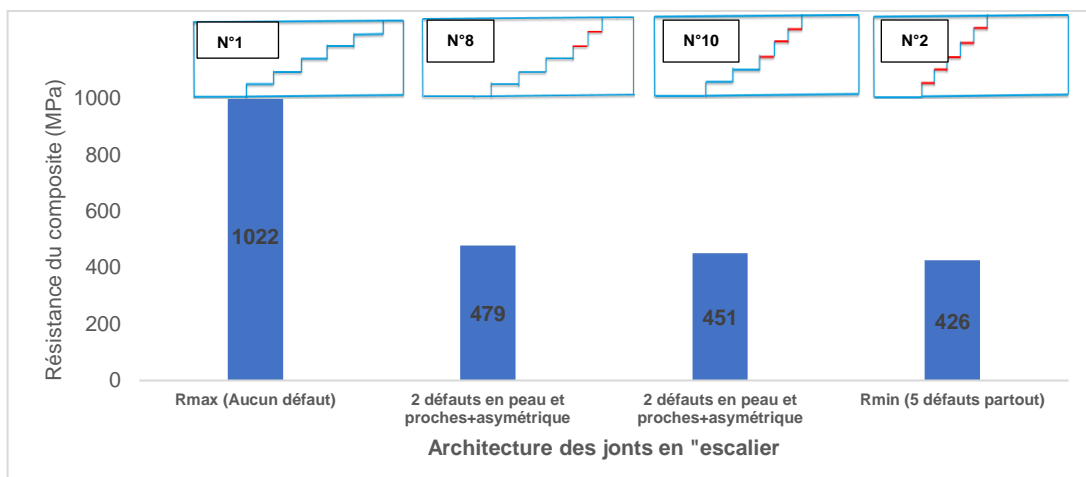


Figure2-4(c) Résistance du composite pour les modèles 1, 2, 8 et 10

2.1.4 Etude de l'influence de grandes longueurs de recouvrements sur la résistance du composite avec $L_r = 5\text{mm}$ ou $L_r = 40\text{mm}$

Afin de vérifier si la longueur de recouvrement $L_r=25\text{mm}$ est supérieure à la longueur de transfert de charge sur le modèle de joints en «escalier», nous avons utilisé une longueur de recouvrement plus élevée. Les simulations des modèles 1, 4 et 10 ont été reprises en remplaçant les longueurs de 25mm par des longueurs de 40mm. La faible longueur de recouvrement reste inchangée à $L_r=5\text{mm}$. La longueur totale du domaine est égale 300mm.

Modèle	Longueur de recouvrement Lr(mm)	Résistance d'un composite (MPa)
N°1-L	40-40-40-40-40	1054
N°1	25-25-25-25-25	1022
N°4-L	40-40-40-40-5	649
N°4	25-25-25-25-5	648
N°10-L	40-40-5-5-5	452
N°10	25-25-5-5-5	451

Tableau2-2 Influence de grandes longueurs de recouvrement sur la résistance du joint en «escalier»

Dans toutes les configurations étudiées (pas de défaut, un défaut en peau ou 3 défauts regroupés en peau) l'augmentation de la grande longueur de recouvrement Lr = 25 à Lr = 40mm, n'apporte pas de modification de la résistance du composite.

2.2 Essais expérimentaux des joints en «escalier»

Les éprouvettes sont constituées d'un stratifié de plis unidirectionnels (UD) avec fibres orientées dans la direction de la charge, selon une géométrie identique à celle utilisée pour le modèle (Figure 2-5). Afin de vérifier et valider le modèle de joints en «escalier», 11 plaques avec différentes longueurs de recouvrements ont été réalisées.

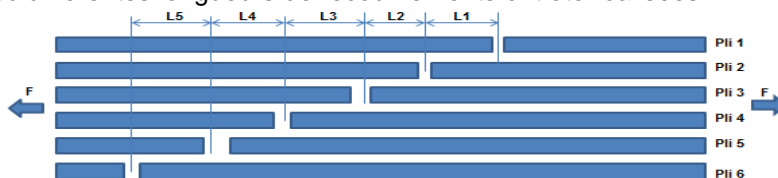


Figure2-5 Schéma des éprouvettes des joints en «escalier»

Les fibres utilisées sont des Hexforce® 48300 unidirectionnelles (UD). Chaque pli est déposé dans le moule 150mm×280mm et enduit de résine LY5052. Puis le moule est fermé et mis dans la presse à plateaux chauffants à la température T=40°C. Les cyclages de pression et de température en fonction du temps sont les mêmes que ceux représentés sur la figure1-20. Les caractéristiques des plaques composites des joints en «escalier» sont rassemblées dans le tableau 2-3. La longueur de recouvrement réellement obtenue est mesurée après rupture de l'éprouvette.

N° de plaque	Longueur de recouvrement Lr (mm)	Longueur de recouvrement mesurée (mm)	Masse de carbone (g)	Masse de la plaque (g)	Taux massique de fibres(%)
SK1	25-25-25-25-25	25-25-25-25-25	71,9	98,5	73
SK2	5-5-5-5-5	3-4-5-4-2	72,9	99,7	73,1
SK3	25-25-5-25-25	25-25-5-25-25	70,5	97,8	72,1
SK4	25-25-25-25-5	25-26-24-24-5	72,1	97,7	73,8
SK5	25-5-25-5-25	25-5-25-5-25	71,3	91,3	78,1
SK6	5-25-25-25-5	6-23-25-25-5	73,1	100,6	72,7
SK7	25-25-5-5-25	24-25-4-6-25	70,3	97,2	72,3
SK8	25-25-25-5-5	25-25-25-4-6,5	71,4	101,1	70,6
SK9	5-25-5-25-5	4-20-5-26-5	79,5	103	77,2
SK10	25-25-5-5-5	23-24-4-6-4	71,3	105,7	67,5
SK11	25-5-5-5-25	23-4-4-7-24	74,1	101,8	72,8

Tableau2-3 Caractéristiques des plaques composites des joints en «escalier»

Après la fabrication des plaques, des talons verre- époxy sont collés aux extrémités. Chaque plaque est découpée en 6 éprouvettes comme expliqué dans la partie 3.1.2 du chapitre 1.

2.3 Comparaison modèle ABAQUS de joints en «escalier» / essais expérimentaux

Les valeurs de la résistance du composite en fonction de l'architecture des joints en «escalier» sont reportées sur la figure 2-6 : en bleu les résultats expérimentaux et en jaune les résultats de la simulation numérique. La ligne rouge sur les schémas représente le défaut. On observe une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques, quelle que soit la configuration. Le modèle numérique de joints en «escalier» est donc validé.

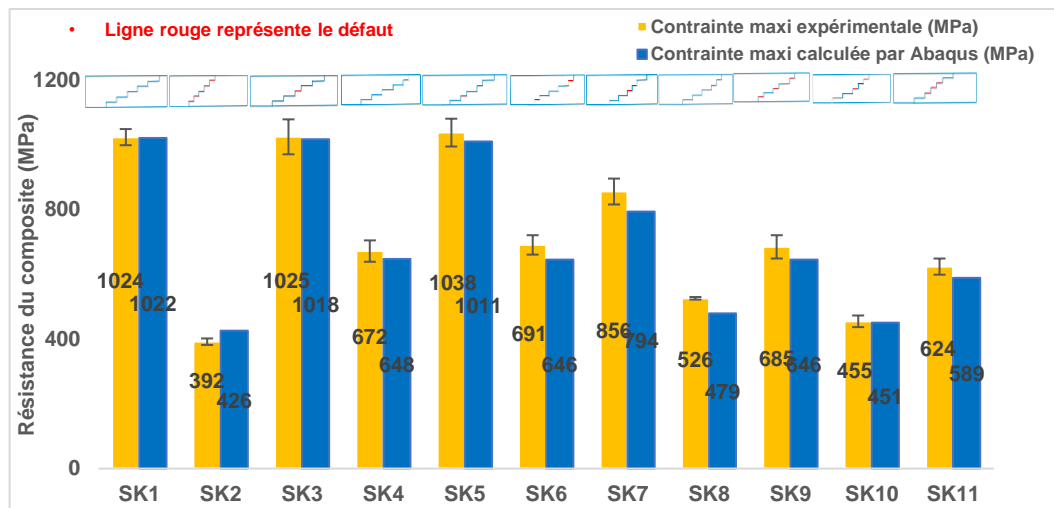


Figure 2-6 Comparaison des résultats du modèle ABAQUS de joint en «escalier» / modèle expérimental

2.4 Etude paramétrique de la longueur de recouvrement sur la résistance du composite des joints en «escalier»

Pour évaluer l'impact sur la résistance de variations sur les longueurs de recouvrement obtenues lors de la mise en œuvre des plaques composites, nous avons réalisé une étude paramétrique à partir du modèle N°9 des joints en «escalier». Pour rappel, avec ce modèle, les 3 défauts sont répartis symétriquement, $L_{r \text{ totale}}=65 \text{ mm}$ et la résistance obtenue numériquement du composite est égale 637 MPa (figure2-3(i)). Pour l'ensemble des simulations présentées, les conditions aux limites, le maillage et la gestion de l'interface sont traités de la même façon qu'avec le modèle présenté au paragraphe 2.1.1.

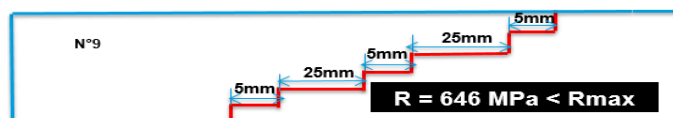


Figure2-7 Trois défauts répartis symétriquement des joints en «escalier»

2.4.1 Influence d'une erreur sur une petite longueur de recouvrement en peau

Nous avons fait varier une petite longueur de recouvrement sur un bord de 3 mm à 7 mm pour étudier l'influence d'une erreur sur une petite longueur de recouvrement en peau (figure2-7(a) (b)). Les résultats sont regroupés dans le tableau 2-4.

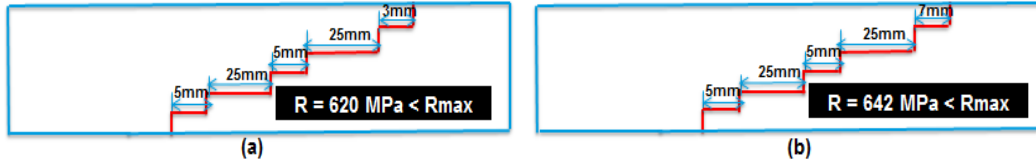


Figure2-7 Etude paramétrique de la longueur de recouvrement sur la résistance. (a) Une erreur $L_r=3\text{mm}$ sur un bord ; (b) Une erreur $L_r=7\text{mm}$ sur un bord

Longueur de recouvrement L_r (mm)	Résistance d'un composite (MPa)
5-25-5-25-3	620
5-25-5-25-5	646
5-25-5-25-7	642

Tableau2-4 Résistance d'un composite sur une erreur sur un bord des joints en «escalier»

Il apparaît que, pour une petite longueur de recouvrement en peau variant de 3mm à 7mm, la résistance d'un composite augmente de 620 MPa à 642 MPa, ce qui montre l'importance de ce paramètre.

2.4.2 Influence d'une erreur sur une grande longueur de recouvrement à l'intérieur

De la même façon, nous avons fait varier une grande longueur de recouvrement à l'intérieur de 23 mm à 27 mm pour étudier l'influence d'une erreur sur une grande longueur de recouvrement à l'intérieur (figure2-7(c) (d)). Les résultats sont regroupés dans le tableau 2-5.



Figure2-7 Etude paramétrique de la longueur de recouvrement sur la résistance. (c) Une grande $L_r=23\text{mm}$ à l'intérieur ; (d) Une grande $L_r=27\text{mm}$ à l'intérieur

Longueur de recouvrement L_r (mm)	Résistance d'un composite (MPa)
5-25-5-23-5	642
5-25-5-25-5	646
5-25-5-27-5	642

Tableau2-5 Résistance d'un composite sur une erreur à l'intérieur des joints en «escalier»

Il apparaît que la variation d'une grande longueur de recouvrement à l'intérieur des joints en «escalier» entre 23mm et 27mm n'a pas d'influence sur la résistance d'un composite, ce qui confirme le résultat obtenu avec l'étude sur le modèle des joints en «escalier» avec 3 défauts répartis symétriquement (figure2-3(i)).

2.4.3 Influence d'une erreur sur une petite longueur de recouvrement à cœur

Nous avons fait varier une petite longueur de recouvrement à cœur de 3 mm à 7 mm pour étudier l'influence d'une erreur sur une petite longueur de recouvrement à cœur (figure2-7(e) (f)). Les résultats sont regroupés dans le tableau 2-6.



Figure2-7 Etude paramétrique de la longueur de recouvrement sur la résistance. (e) Une petite $L_r=3\text{mm}$ à cœur ; (f) Une petite $L_r=7\text{mm}$ à cœur

Longueur de recouvrement $L_r(\text{mm})$	Résistance d'un composite (MPa)
5-25-3-25-5	644
5-25-5-25-5	646
5-25-7-25-5	646

Tableau2-6 Résistance d'un composite sur une erreur à cœur des joints en «escalier»

Il apparaît que la variation d'une petite longueur de recouvrement à cœur des joints en «escalier» entre 3mm et 7mm n'a pas d'influence sur la résistance d'un composite (résistances respectives égales à 644 et 646 MPa), ce qui confirme le résultat obtenu avec l'étude sur le modèle des joints en «escalier» avec 3 défauts répartis symétriquement (figure2-3(i)).

2.4.4 Influence des trois erreurs sur trois petites longueurs de recouvrement répartis symétriquement

Nous avons fait varier trois petites longueurs de recouvrement répartis symétriquement de 3mm à 7mm pour étudier l'influence de trois erreurs sur trois petites longueurs de recouvrement répartis symétriquement (figure2-7(g) (h)). Les résultats sont regroupés dans le tableau 2-7.



Figure2-7 Etude paramétrique de la longueur de recouvrement sur la résistance. (g) 3 petites $L_r=3\text{mm}$ répartis symétriquement ; (h) 3 petites $L_r=7\text{mm}$ répartis symétriquement

Longueur de recouvrement $L_r(\text{mm})$	Résistance d'un composite (MPa)
3-25-3-25-3	618
5-25-5-25-5	646
7-25-7-25-7	661

Tableau2-7 Résistance d'un composite sur 3 erreurs répartis symétriquement des joints en «escalier»

Il apparaît que, pour les valeurs des trois petites longueurs de recouvrement répartis

symétriquement variant de 3mm à 7mm, la résistance d'un composite augmente de 618 MPa à 661 MPa, ce qui montre l'importance de ce paramètre.

2.4.5 Influence des deux erreurs sur deux grandes longueurs de recouvrement à cœur

Nous avons fait varier deux grandes longueurs de recouvrement à cœur de 23mm à 27mm pour étudier l'influence des erreurs sur deux grandes longueurs de recouvrement à cœur (figure2-7(i) (j)). Les résultats sont regroupés dans le tableau 2-8.

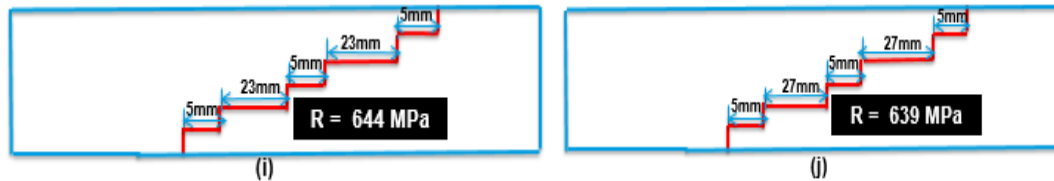


Figure2-7 Etude paramétrique de la longueur de recouvrement sur la résistance. (i) 2 grandes $L_r=23\text{mm}$ à cœur ; (j) 2 grandes $L_r=27\text{mm}$ à cœur

Longueur de recouvrement L_r (mm)	Résistance d'un composite (MPa)
5-23-5-23-5	644
5-25-5-25-5	646
5-27-5-27-5	639

Tableau2-8 Résistance d'un composite en fonction des erreurs à cœur (joints en «escalier»)

Il apparaît que la variation des deux grandes longueurs de recouvrement à cœur des joints en «escalier» entre 23mm et 27mm n'a pas d'influence sur la résistance d'un composite (résistances respectives égales à 639 et 644 MPa), ce qui confirme le résultat obtenu avec l'étude sur le modèle des joints en «escalier» avec 3 défauts répartis symétriquement (figure2-3(i)).

2.4.6 Conclusions sur l'influence des erreurs sur les longueurs de recouvrement des joints en «escalier»

En résumé de l'ensemble de ces simulations on peut conclure que : (i) les erreurs sur les longueurs de recouvrement à l'intérieur n'ont pas d'influence sur la résistance des joints en «escalier» ; (ii) une erreur sur la longueur de recouvrement en peau ou deux erreurs sur les longueurs de recouvrement en peau et "éloignées" l'une de l'autre, ont une influence sensible sur la résistance du composite des joints en «escalier». En conséquence, pour obtenir une bonne résistance des joints en «escalier», on doit éviter la petite longueur de recouvrement en peau.

3. Modélisation de la résistance des joints en «emboîtement»

Après la validation du modèle numérique des joints en «escalier», nous avons simulé des géométries avec des longueurs de recouvrement symétriques qu'on appelle les joints en «emboîtement».

3.1 Simulation numérique des joints en «emboîtement»

3.1.1 Modèle numérique

L'objectif du modèle de joints en «emboîtement» est de simuler un composite avec différentes longueurs de recouvrement symétrique. Le domaine de simulation numérique des joints en «emboîtement» est un modèle à 5 plis avec des fibres se recouvrant partiellement avec une interface représentant la résine entre les fibres (figure 2-9). Une fibre est un mélange de filaments UD de carbone + résine. Chaque fibre possède une épaisseur $h=0,25\text{mm}$ et l'épaisseur totale du modèle est égale à $1,25\text{mm}$; l'interface n'a pas d'épaisseur. La largeur (dans la direction perpendiculaire au plan) est $b=20\text{mm}$ et la longueur totale du modèle est égale 180mm . La longueur de recouvrement $L1$ est égale à $L4$ et $L2$ est égale à $L3$. On a utilisé une longueur de recouvrement très faible $Lr=5\text{mm}$ et une longueur de recouvrement élevée $Lr=25\text{mm}$.

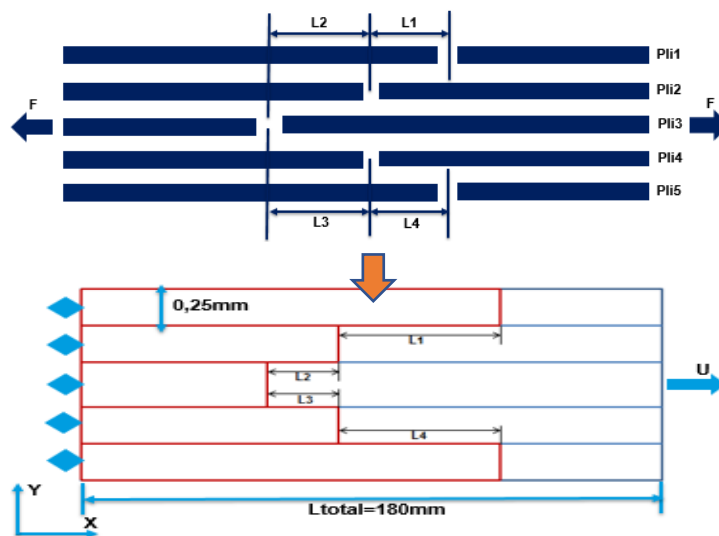


Figure2-9 Domaine modélisé pour des joints en «emboîtement»

Le maillage, la taille des éléments, les conditions aux limites et la gestion de l'interface sont traités de la même façon qu'avec le modèle présenté au paragraphe 2.1.1 du chapitre 2.

3.1.2 Résultats des simulations numériques

Comme pour l'étude des joints en «escalier», nous avons simulé différentes configurations que nous détaillons par la suite.

Pour le modèle N°1 la longueur de recouvrement est $Lr=25\text{mm}$ partout et la longueur de recouvrement totale est $Lr_{\text{totale}} = 100\text{mm}$ (figure 2-10(a)) et pour le modèle N°2 nous avons une petite longueur de recouvrement $Lr=5\text{mm}$ partout et la longueur de recouvrement totale est $Lr_{\text{totale}} = 20\text{mm}$ (figure 2-10(b)). La résistance du composite du modèle N°1 est égale à $R_{\text{max}}= 921 \text{ MPa}$ et celle du composite du modèle N°2 est égale à $R_{\text{min}}=405 \text{ MPa}$. Il est donc clair que plus Lr est grand, plus R_{max} est grand.

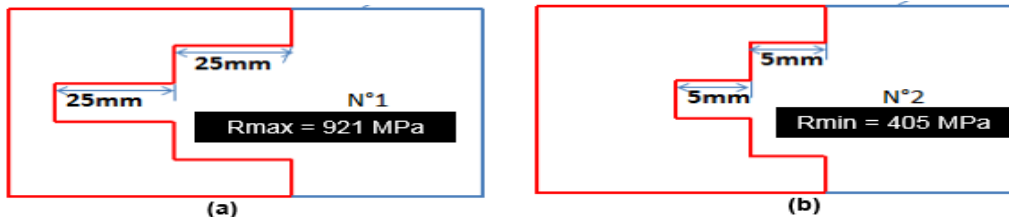


Figure 2-10 Schéma du modèle des joints en «emboîtement». (a) $L_r=25\text{mm}$ partout; (b) $L_r=5\text{mm}$ partout

Le modèle N°3 se caractérise par une longueur de recouvrement $L_r=25\text{mm}$ partout et par une longueur de recouvrement totale $L_{r \text{ totale}} = 100\text{mm}$ (figure 2-10(c)) alors que le modèle N°4 a une petite longueur de recouvrement $L_r=5\text{mm}$ partout et une longueur de recouvrement totale $L_{r \text{ totale}} = 20\text{mm}$ (figure 2-10(d)). En comparaison les deux, on a étudié l'influence de L_r totale sur la résistance du composite. La résistance du composite du modèle N°3 est égale à $R = 836 \text{ MPa}$ et est donc très proche de R_{max} , mais la résistance du composite du modèle N°4 est égale à 407 MPa et est donc très proche de R_{min} . Nous en concluons donc que plus L_r est grand, plus R_{max} est grand.



Figure 2-10 Schéma du modèle des joints en «emboîtement». (c) $L_r=25\text{mm}$ partout ; (d) $L_r=5\text{mm}$ partout

Sur le modèle N°5, 2 défauts ont été positionnés à cœur et la longueur de recouvrement totale est $L_{r \text{ totale}} = 60\text{mm}$ (figure 2-10(e)) et sur le modèle N°6 les 2 défauts ont été positionnés sur les bords et la longueur de recouvrement totale est $L_{r \text{ totale}} = 60\text{mm}$ (figure 2-10(f)). La résistance d'un composite du modèle N°5 est égale 665 MPa , elle est donc plus faible que R_{max} . La résistance d'un composite du modèle N°6 est égale 443 MPa , elle est très proche de R_{min} . Il apparaît donc que 2 défauts sur les bords font fortement chuter la résistance du composite, alors que 2 défauts à cœur font modérément chuter la résistance du composite.

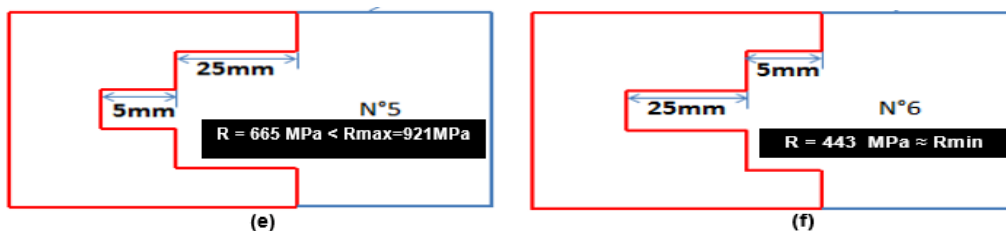


Figure 2-10 Schéma du modèle des joints en «emboîtement». (e) Deux défauts à cœur; (f) Deux défauts sur les bords

Pour le modèle N°7, 2 défauts ont été positionnés à cœur et la longueur de recouvrement totale est $L_{r \text{ totale}} = 60\text{mm}$ (figure 2-10(g)) et pour le modèle N°8 les 2 défauts ont été positionnés sur les bords et la longueur de recouvrement totale est $L_{r \text{ totale}} = 60\text{mm}$ (figure 2-10(h)). On constate que la résistance d'un composite du modèle N°7 est plus faible que R_{max} (719 MPa) et que la résistance d'un composite du modèle N°8 est très proche de R_{min} (469 MPa). Il apparaît que deux défauts sur les bords font fortement chuter la résistance du composite, alors que deux défauts à cœur font modérément chuter la résistance du composite.



Figure2-10 Schéma du modèle des joints en «emboîtement». (g) Deux défauts à cœur ; (h) Deux défauts sur les bords

3.1.3 Conclusions sur le modèle numérique des joints en «emboîtement»

Les valeurs de la résistance du composite en fonction de l'architecture des joints en «emboîtement» sont résumées dans le tableau 2-9 et synthétisés sur la figure 2.11 sur laquelle la ligne rouge sur les schémas représente le défaut ($L_r=5\text{mm}$).

N° de plaque	Longueur de recouvrement L_r (mm)	Longueur de recouvrement totale (mm)	Contrainte maxi calculée (MPa)
1	-25 / -25 / 25 / 25	100	921
2	-5 / -5 / 5 / 5	20	405
3	-25 / 25 / -25 / 25	100	836
4	-5 / -5 / 5 / 5	20	407
5	-25 / -5 / 5 / 25	60	665
6	-5 / -25 / 25 / 5	60	443
7	-25 / 5 / -5 / 25	60	719
8	-5 / 25 / -25 / 5	60	469

Tableau 2-9 Résultats du modèle ABAQUS des joints en «emboîtement»

La résistance du modèle N°1 et la résistance du modèle N°3 sont égales à la résistance maximale d'un composite $R_{max} \sim 836 / 921$ MPa, alors que la résistance du modèle N°2 et la résistance du modèle N°4 sont égales à la résistance minimale $R_{min} \sim 405 / 407$ MPa. En conclusion, plus L_r est grand, plus R_{max} est grand.

La position du défaut et le nombre de défauts ont de l'influence sur la résistance des joints en «emboîtement» :

(i) 2 défauts à cœur font chuter la résistance du composite (figure2-11(a)).

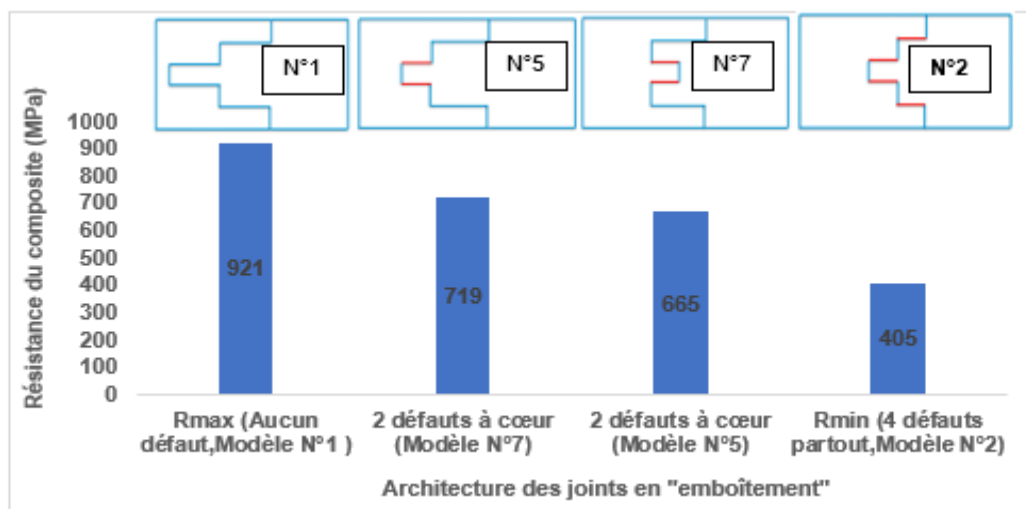


Figure2-11(a) Résistance du composite pour les modèles 1, 2, 5 et 7

(ii) 2 défauts sur les bords sont équivalents à un matériau entièrement composé de défauts (figure2-12(b)).

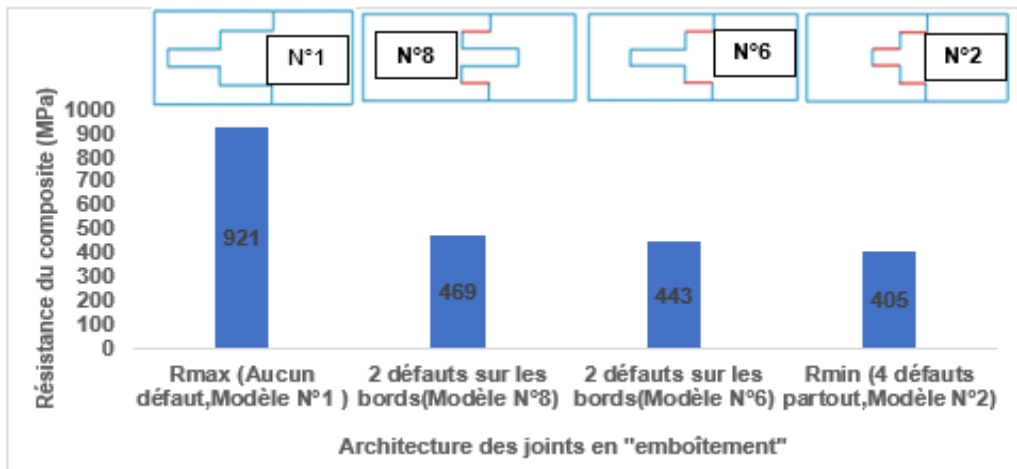


Figure2-11(b) Résistance du composite pour les modèles 1, 2, 6 et 8

4. Conclusions et récapitulatif du comportement mécanique du modèle avec les différentes longueurs de recouvrement

Pour mettre en évidence l'influence de l'architecture fibreuse sur la rupture d'un composite à fibres recyclées, avec des faibles longueurs de recouvrement (5mm) représentant des défauts de l'architecture, 2 modèles numériques ont été développés pour simuler 2 types d'architecture de recouvrement.

Tout d'abord un premier modèle numérique appelé joints en « escalier » a permis de simuler des longueurs de recouvrement disposées de façon asymétrique. Les propriétés mécaniques de l'interface fibres de carbone (ensimées) avec résine époxy ont été identifiées dans le chapitre 1. Ce modèle a été validé par comparaison avec des essais expérimentaux.

Il a été montré que :

- Plusieurs défauts sont tolérables s'ils sont éloignés et positionnés à cœur. Dans ce cas la résistance du composite est très proche de celle d'un composite avec une architecture sans défaut ;
- 1 défaut en peau \equiv 2 défauts sur les bords \equiv 2 défauts à cœur et proches \equiv 3 défauts répartis symétriquement \equiv 3 défauts à cœur et proches. Leur présence fait fortement chuter la résistance du composite ;
- Quelques défauts regroupés en peau et à cœur et proches sont équivalents à un matériau entièrement composé de défauts. Leur présence conduit à une très faible résistance du composite.

Des simulations complémentaires ont démontré que les incertitudes sur les longueurs de recouvrement à l'intérieur du matériau n'ont pas d'influence sur la résistance du composite avec joints en « escalier », alors que les incertitudes sur la longueur de recouvrement en peau ont une influence faible sur la résistance du composite avec joints en « escalier ».

Dans la deuxième partie du chapitre 2, un modèle numérique appelé joints en «emboîtement» a permis de simuler des longueurs de recouvrement disposées de façon symétrique. Les résultats de la simulation numérique démontrent que :

- 2 défauts regroupés à cœur font modérément chuter la résistance du composite ;
- 2 défauts en peau sont équivalents à un matériau entièrement composé de défauts.

Sur la base de l'ensemble des résultats obtenus sur les 2 configurations (joints en «escalier» et joints en «emboîtement»), nous en concluons qu'il faudra éviter des architectures fibreuses qui comportent des petites longueurs de recouvrement en peau alors que des défauts à cœur sont tout à fait tolérables.

**Chapitre 3 : Etude de l'énergie à rupture de
l'interface (G_{IIC}) des différentes matrices
thermoplastiques**

Après avoir étudié un composite avec différentes longueurs de recouvrement, on va chercher une résine thermoplastique (Tp) qui possède un G_{IIC} supérieur à 1,56 KJ/m². Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à l'imprégnation, par thermocompression, des fibres de carbone par une matrice thermoplastique. Ensuite on va utiliser le joint à double recouvrement (réf 6P6C) pour mesurer le G_{IIC} obtenu avec différentes matrices Tp. Cela permettra de choisir une matrice Tp qui possède un G_{IIC} supérieur au G_{IIC} de l'époxy afin d'augmenter la résistance du composite à FCr.

1. Essai d'imprégnation des fibres de carbone par une matrice thermoplastique

1.1 Objectif

L'objectif de ce travail est de vérifier qu'on est capable d'imprégner un empilement de plis FCr avec une matrice thermoplastique (plus visqueuse qu'une résine époxy). Pour cela, on va réaliser des plaques avec différentes conditions opératoires et faire des observations au microscope sur des coupes transverses.

On doit préciser que les conditions retenues ne sont pas optimisées, et qu'il est probablement possible d'obtenir de meilleures propriétés et des temps de cycles plus courts. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'on va normaliser les valeurs de résistance par la suite.

Les conditions courantes de mise en œuvre de composites fibres de carbone/Tp sont présentées dans le tableau 3-1.

Type de matrice	Produit et procédé	Durée maintient (min)	Pression (MPa)	T (°C)	Vitesse ref (°C/min)	Référence
PA6	pré imprégné	10	0,5	230	20	[M. Arhant, 2016]
	film stacking	10	2	250		[E.C. Bothelho et al., 2003]
	pré imprégné	6,7	5,5	250		[Y. Wan et al., 2016]
	pré imprégné	3,5	4	280		[Y. Ma et al., 2018]
	commélé	16,7	1,4	280		[M.M.B. Hasan et al., 2019]
	film stacking	15	1	270	20	[M. Boulanghien, 2014]
PA 66	film stacking	10	2	270		[E.C. Bothelho et al., 2014]
	commélé	5	2	290	15	[H.M. El-Dessouk et al., 2019]
PA 12	commélé	10	8,6	240	10	[P. McDonnel et al., 2001]
	commélé	2	1	240		[N. Bernet et al., 2001]
PET	film stacking	3	1	270		[H.J. Um et al., 2021]

Tableau3-1 Conditions de mise en œuvre de composites fibres de carbone/TP

La méthode que nous avons retenue est le « film stacking », qui consiste à insérer dans le moule un empilement de couches de renfort non imprégnées et de couches de thermoplastique, sous forme de film ou de poudre. Le processus de production se compose des trois phases suivantes :

- (i) Chauffer le moule pour dépasser la température de fusion de la matrice ;
- (ii) Augmenter la pression pour forcer la matrice thermoplastique à imprégner le renfort ;
- (iii) Refroidir le moule pour solidifier le stratifié.

Nous avons dans un premier temps fait des essais avec un tissu UD neuf et une matrice polyamide (alliage PA6 et PA66).

La pièce composite est réalisée à partir de 8 plis de fibres de carbone continues neuves (UD) poudrées de polyamide. Les couches de fibres de carbone et de poudre de polyamide sont superposées avant d'être compressées et chauffées pour obtenir la pièce finale (figure 3-1). La compression de la pièce suit un cycle force/température en fonction du temps (figure 3-2).

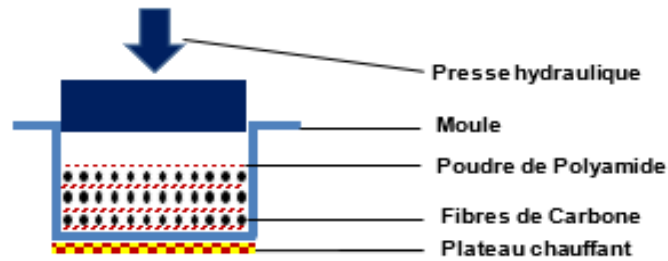


Figure 3-1 Schéma de l'imprégnation avec du PA

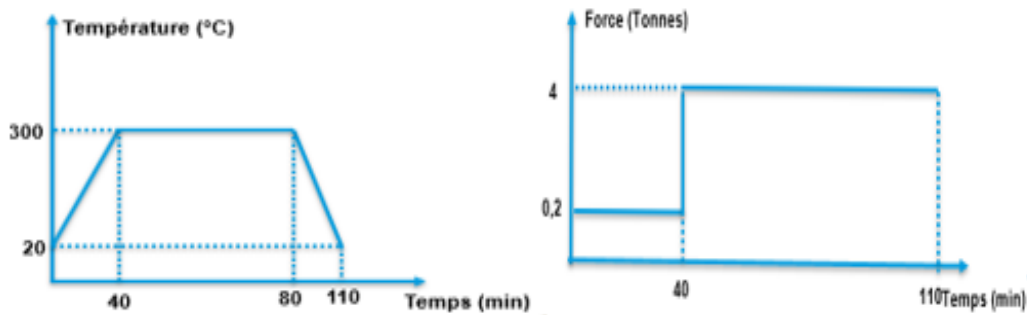


Figure 3-2 Cyclage de la force et de la température en fonction du temps pour Fc/PA (PA6&PA66)

Une fois les pièces réalisées, elles peuvent être soumises à l'essai de résistance mécanique. Cependant, il est indispensable au préalable de revenir sur les conditions de mise en œuvre des composites car nous avons constaté que les fibres de carbone étaient très mal imprégnées. Sur la figure 3-3, nous pouvons ainsi observer en noir des porosités sur la pièce composite ce qui signifie que la pièce possède des cavités qui ne sont pas remplies de polyamide. Notre objectif est de trouver une méthode pour résoudre ce problème.

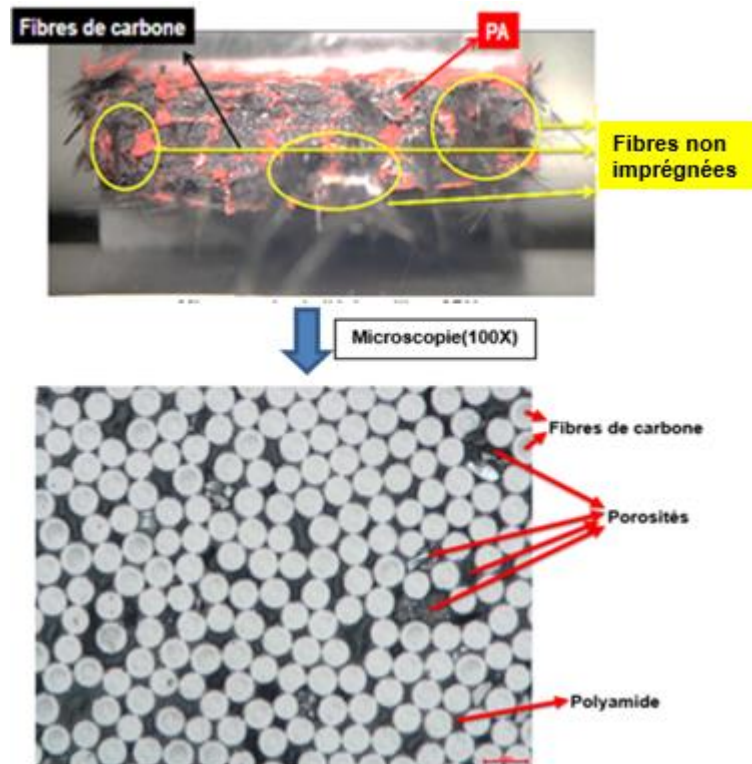


Figure 3-3 Microscopie (50X) de l'échantillon des Fibres de carbone (8 plis) + matrice PA

La mauvaise imprégnation du carbone par le polyamide peut avoir différentes causes :

- Le PA fondu est évacué du moule sans avoir imprégné les couches de fibres ;
- La mouillabilité de la fibre de carbone n'est pas suffisante ou bien la compatibilité fibre/matrice est mauvaise.

Ces deux points ont été investigués afin de résoudre le problème d'imprégnation incomplète.

1.2 Etude de l'étanchéité du moule

Pour imprégner les fibres de polyamide nous utilisons une presse à plateaux chauffants. Le plateau appuie sur une plaque qui rentre dans le moule. Pour faciliter la compression, un jeu de quelques dixièmes de mm a été laissé entre la plaque et le moule. Pour améliorer l'étanchéité du moule afin de réduire le débit de fuite du polyamide, différentes méthodes ont été envisagées (figure3-4) : (1) introduction d'un voile de verre pour diminuer le jeu supérieur du moule (figure3-4 (a)) ; (2) introduction de papier aluminium (figure3-4 (b)) ; (3) introduction d'un joint silicone (figure3-4 (c)). Les cycles de pression et de température sont représentés sur la figure 3-2. Si les observations montrent clairement une diminution du nombre de cavités, quelle que soit la méthode utilisée, aucune des 3 techniques ne s'avère être optimale (figure3-5).

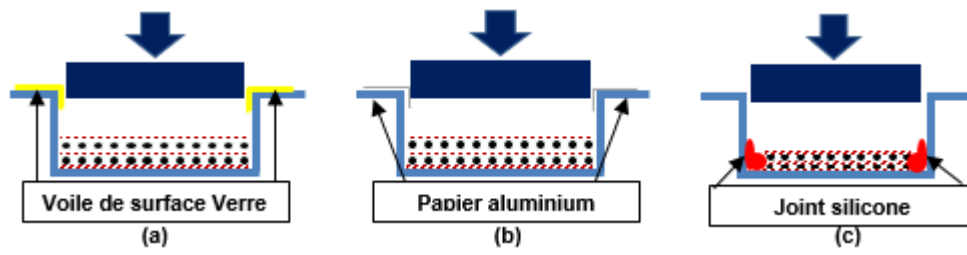


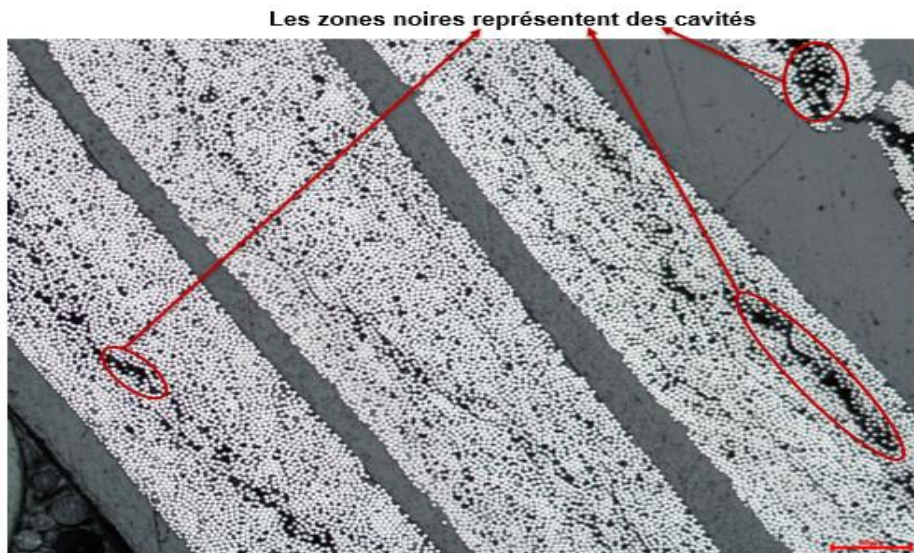
Figure 3-4 Différents procédés de la mise en œuvre de la plaque. (a) Voile de surface verre; (b) Papier aluminium; (c) Joint silicone



(a)



(b)



(c)

Figure 3-5 Résultats de microscopie (10X) sur les essais d'étanchéité. (a) Voile de surface verre ; (b) Papier aluminium ; (c) Joint silicone

1.3 Etude de l'imprégnation

Le renfort utilisé est un tissu unidirectionnel HexForce@48300 C 100 E01 1F. Il est constitué de mèches de carbone T700 12K, liées par des fils de verre (figure 3-6). Ce tissu est poudré sur une face avec une poudre époxy pour permettre son préformage. Les fibres de carbone sont ensimées (taux d'ensimage 1%). Après avoir constaté une compatibilité médiocre entre le polyamide et l'époxy, notre idée a été de supprimer l'ensimage et le liant époxy, opération que nous avons réalisée par pyrolyse. Pour cela les plis de fibres de carbone sont portés dans un four à une température de 500°C pendant une durée de 16 minutes. Après cette étape, un poudrage polyamide permet de lier les fibres entre elles. Les cyclages de pression et de température sont présentés sur la figure 3-2.

Les observations microscopiques montrent que les fibres de carbone sont très bien imprégnées, les porosités ayant disparu comme on peut le constater sur la figure 3-7.

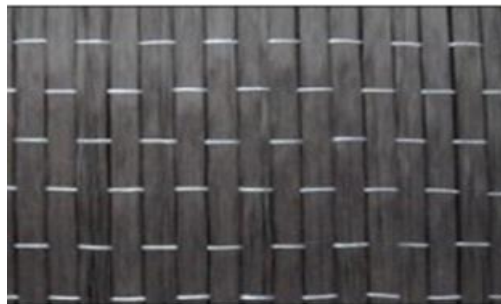


Figure 3-6 Tissus UD des fibres de carbone sur HexForce@48300 C 100 E01 1F

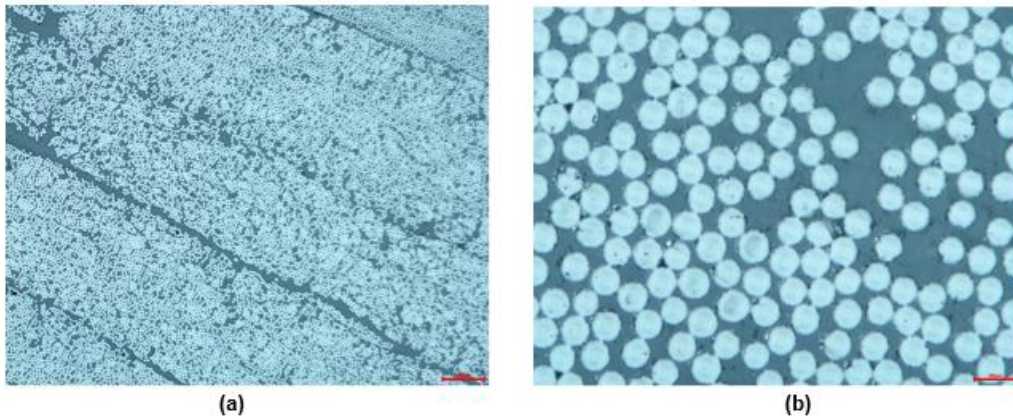


Figure 3-7 Résultats de microscopie sur l'imprégnation des fibres de carbone. (a) Grossissement : 20X ; (b) Grossissement 100X

Ce résultat confirme que la mauvaise imprégnation des fibres avant la pyrolyse est essentiellement due à la présence d'ensimage sur les fibres.

1.4 Conclusion sur l'étude de l'imprégnation des fibres de carbone par la poudre de polyamide

Cette étude visant à améliorer l'étanchéité du moule et les couplages fibre/matrice a permis de définir les conditions pour obtenir une pièce parfaitement imprégnée et de montrer en particulier l'importance de la suppression de l'ensimage pour permettre au polyamide d'imprégner les fibres de carbone.

2. Sélection des résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques candidates pour renforcer les fibres de carbone recyclées doivent respecter les 4 critères suivants :

- Avoir une faible viscosité ;
- Être disponible commercialement ;
- Posséder un G_{IIC} élevé ;
- Avoir un faible impact environnemental.

Sachant que les 2 premiers critères sont faciles à évaluer à partir des fiches techniques des fournisseurs, nous avons donc tout d'abord réalisé une première sélection à partir de ces 2 critères (tableau 3-2).

Grades de résine	Viscosité en T°C	T d'injection(°C)	Source
PA66-Grilon AS V0	200 Pa·s à 270°C	270	[EMS]
PA6-SCHULAMID® 6 MV 14	150 Pa·s à 270°C	270	[LyondellBasel]
PET-Fe-Group Invest Zrt	100 Pa·s à 280°C	280	[F. Ronkay et al., 2017]
PA12-Rilsamid® AMNO P40 TLD	80 Pa·s à 270°C	270	[ARKEMA]
PC-Makrolon® LED2245	70 Pa·s à 320°C	320	[Covestro AG]

Tableau3-2 Viscosité en température des résines thermoplastiques

Ensuite, pour chaque résine thermoplastique présélectionnée, on va réaliser des essais sur joint à double recouvrement pour déterminer leur G_{IIC} .

3. Détermination de l'énergie à rupture de l'interface (G_{IIC}) sur les différentes résines thermoplastiques

Dans le chapitre 1, on a déjà montré que seule la valeur de l'énergie de rupture de l'interface (G_{IIC}) avait une influence sur la résistance du composite. En conséquence, la réalisation de matériaux composites à fibres recyclées très résistants passe par l'utilisation d'une matrice thermoplastique qui possède un G_{IIC} supérieur à 1,56 KJ/m².

Pour mesurer la valeur de G_{IIC} , nous allons utiliser des essais de traction sur joint à double recouvrement ayant une grande longueur de recouvrement. Les éprouvettes sont constituées d'un stratifié de plis unidirectionnels (UD) avec fibres orientées dans la direction de la charge et la longueur de recouvrement (L_r) est fixée à 60mm (figure 3-8).

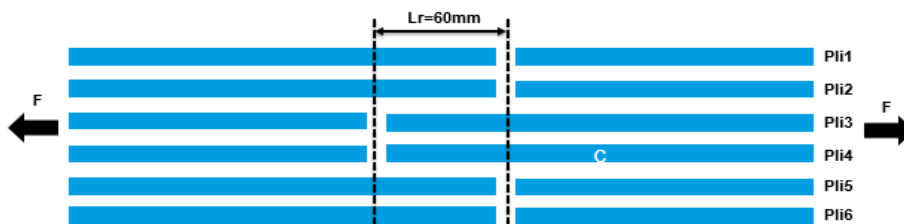


Figure 3-8 Schéma du modèle du joint à double recouvrement ($L_r=60mm$)

Les fibres utilisées sont des Hexforce® 48300 unidirectionnelles (UD). La mise en œuvre comporte 3 étapes principales : (1) les plis de fibres de carbone sont portés à 500°C pendant une durée de 16 minutes pour réaliser la pyrolyse ; (2) chaque pli est déposé dans le moule 150mm×280mm et enduit de poudres de résine thermoplastique ; (3) puis le moule est fermé et mis dans la presse à plateaux chauffants.

La méthode pour faire des essais de traction est la même que celle présentée au paragraphe 3.1.2 du chapitre 1.

3.1 Mise en œuvre pour les différents composites du joint à double recouvrement (ref.6P6C)

Pour diminuer au maximum la viscosité, nous avons fait le choix d'employer une température supérieure à la température de fusion, qui reste cependant inférieure à la température de dégradation thermique (tableau 3-3).

Matrice thermoplastique	PET	PA6 & PA66	PA12	PA6	PC
Température de fusion(°C)	260	220	176	220	-
Température maximale(°C)	280	300	280	300	300

Tableau 3-3 Température de fusion pour les différentes matrices thermoplastiques

Pour les poudres de polyamide (PA6 & PA66) la mise en œuvre suit les cycles représentés sur la figure 3-2. Pour les poudres de PET et PA12, on a diminué la température à 280°C et le temps total du cycle a été diminué à 110 minutes pour économiser l'énergie (figure 3-9).

Après avoir remarqué que les fibres de carbone étaient désalignées par le flux de matière, nous avons décidé d'appliquer la pression de manière progressive afin de limiter ce phénomène. Notre presse ne nous permettant pas d'appliquer des rampes de pression, nous avons augmenté la pression par paliers (figure 3-9).

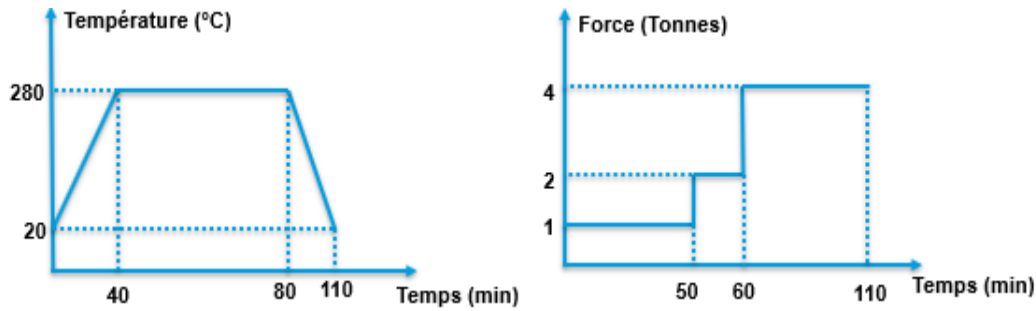


Figure 3-9 Cyclage de la force et de la température en fonction du temps pour Fc/PET et Fc/PA12

Des travaux ont démontré que le PA6 permettait d'obtenir une valeur de G_{IIC} très élevée (supérieure à 2 KJ/m²) lorsque la pression de mise en œuvre est comprise entre environ 2 et 4 MPa [J.P. Reisa et al.2019]. Nous avons alors fabriqué une plaque composite Fc/PA6 sous la forme de film avec une force de 8t (soit 2 MPa environ) et un cycle d'une durée de 110 minutes (figure 3-10).

La mise en œuvre avec le PC et le LEXAN-163 a été obtenu à partir des mêmes cycles (figure 3-10). On peut noter que le LEXAN-163 est sous la forme de granulés de taille égale à environ 2,3 mm.

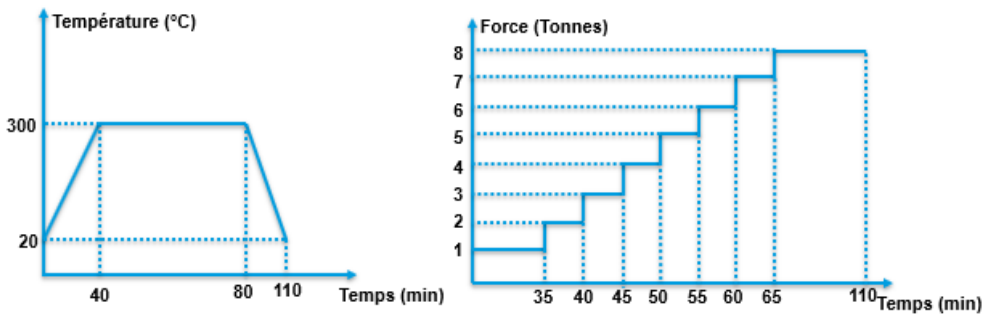


Figure 3-10 Cyclage de la force / température en fonction du temps pour Fc/PA6 film et Fc/PC granulé

Les caractéristiques des différents joints à double recouvrement (ref.6P6C) sont représentées dans le tableau 3-4. La longueur de recouvrement réellement obtenue est mesurée après rupture de l'éprouvette.

N° de plaque	Lr théorique (mm)	Lr Mesurée (mm)	Masse des fibres (g)	Masse de résine (g)	Masse de la plaque (g)	Taux de fibres (% masse)
6P6C60-PA rouge	60	57	71,2	63	113	63
6P6C60-PA12	60	58	75,6	63	121,3	62,3
6P6C60-PET	60	59	72	63	128,9	55,8
6P6C60-PA6 film	60	57	76,7	52,5	107,5	71,3
6P6C60-PC granulé	60	58	73	63	115	63,5

Tableau 3-4 Caractéristiques pour les différents composites du joint à double recouvrement (ref.6P6C)

Nous avons choisi une pression maximale de 8t pour le cyclage en pression (figure 3-10). Pour analyser l'influence de la pression de mise en œuvre sur la résistance du composite, nous avons testé deux niveaux de pression. Les conditions opératoires sont celles de la figure 3-11. La longueur de recouvrement a été fixée à 60 mm pour l'ensemble des plaques fabriquées et la résine utilisée est le PA rouge (PA6&PA66).

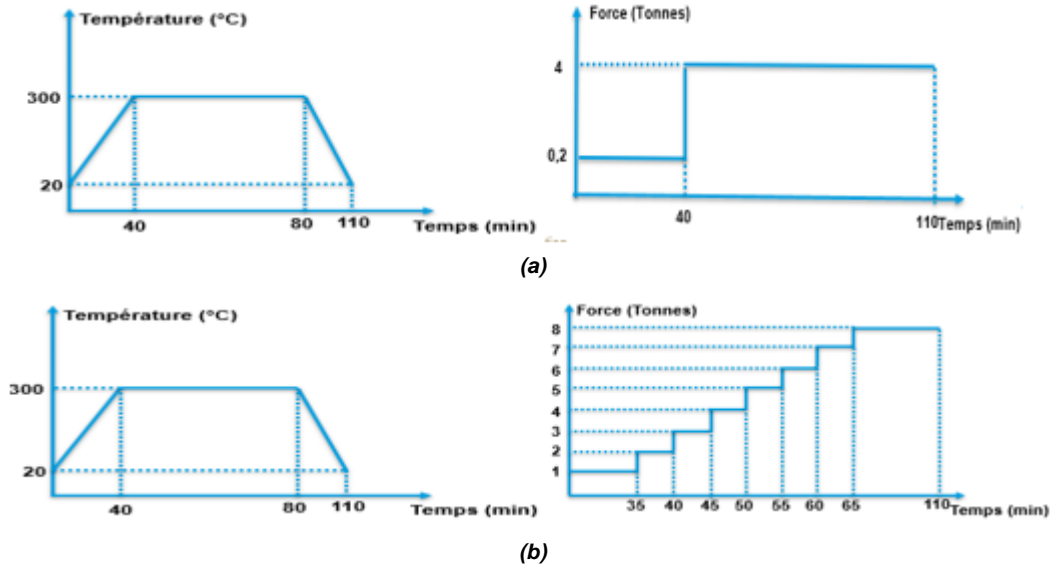


Figure 3-11 Cyclage de la pression et de la température en fonction du temps. (a) La pression lors de la mise en œuvre égale à 4t ; (b) La pression lors de la mise en œuvre égale à 8t

Les résultats obtenus montrent clairement que la pression imposée pendant la mise en œuvre n'a pas d'influence sur la résistance finale du composite (tableau 3-5).

Type de plaque	Masse des fibres(g)	Masse de résine(g)	Masse de plaque (g)	Epaisseur de plaque (mm)	Contrainte maxi (MPa)	Ecart Type (MPa)
6P6C60-Fc/PA rouge (4t)	71,2	63	112	1,7	387	±17
6P6C60-Fc/PA rouge (8t)	73	63	113	1,68	378	±22

Tableau 3-5 Caractéristiques de la plaque composite et résultats des essais en traction

3.2 Problématique de la mise en œuvre du composite du joint à double recouvrement Fc/PC granulé

Les granulés de PC (LEXAN-163) étant très durs, nous avons observé que la structure des fibres de carbone a été détériorée lors de la mise en œuvre de la plaque Fc/PC (figure 3-12). Pour résoudre ce problème, 2 solutions ont été explorées :

- Réduction des granulés de PC en poudre ;
- Utilisation de films de PC.

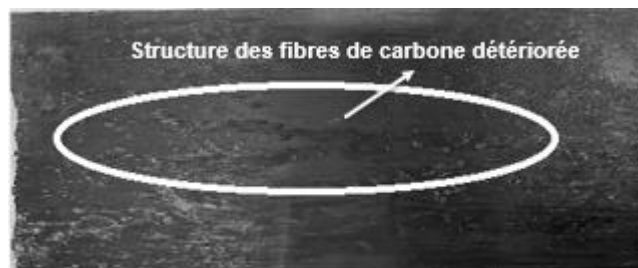


Figure 3-12 Plaque Fc/PC granulé du joint à double recouvrement (Lr=60 mm)

3.2.1 Réduction des granulés de PC en poudre

Les granulés ont été déposés dans un moule cylindrique en acier puis thermo-compressés suivant le cycle de la figure 3-13 pour former finalement un cylindre. Le cylindre a ensuite été réduit en copeaux qui ont été broyés pour obtenir de la poudre (figure3-14).

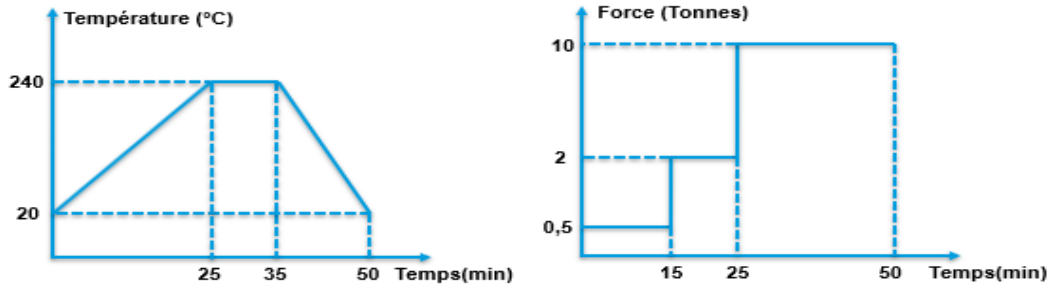


Figure 3-13 Cyclage de la force / température en fonction du temps pour former du cylindre en PC



Figure 3-14 Processus de la réduction des granulés de PC en poudre

3.2.2 Fabrication des films avec les granulés de PC

La 2^{ème} solution a consisté à fabriquer des films à partir des granulés à l'aide d'une thermocompression à la température de 240°C (figure 3-15) en conservant le cycle utilisé lors de la solution précédente (figure3-10).

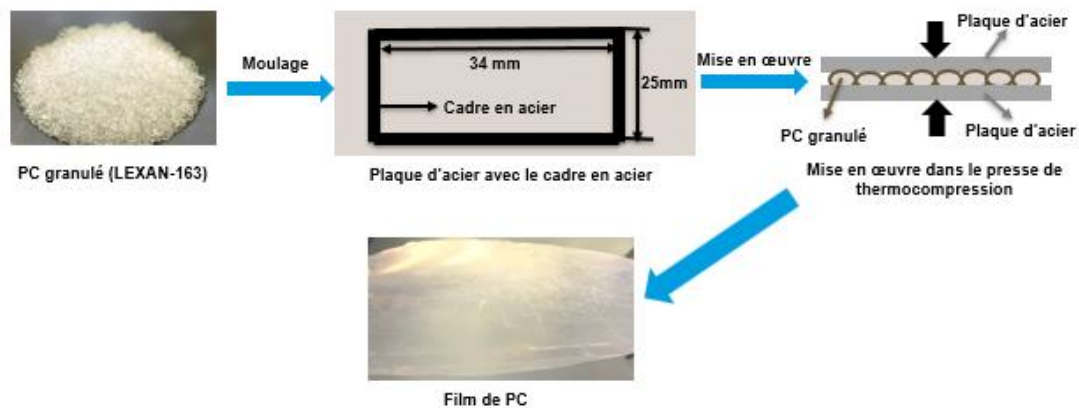


Figure 3-15 Processus de fabrication des films de PC

3.3 Fabrication des plaques composite du joint à double recouvrement Fc/PC poudre et Fc/PC film (ref.6P6C avec Lr=60mm)

La fabrication de la plaque composite du joint à double recouvrement Fc/PC poudre (6P6C60-Fc/PCP) se fait à partir de 6 plis de fibres de carbone discontinues/poudre de PC superposés avant d'être compressés et chauffés (figure3-16(a)). Le film de PC possède une masse supérieure à la couche de poudre qui a servi de base à la solution précédente. Afin de garder une masse finale du composite identique pour les 2 solutions, nous avons fait le choix de superposer 6 couches de fibres avec 4 plis de film uniquement (figure 3-16(b)).

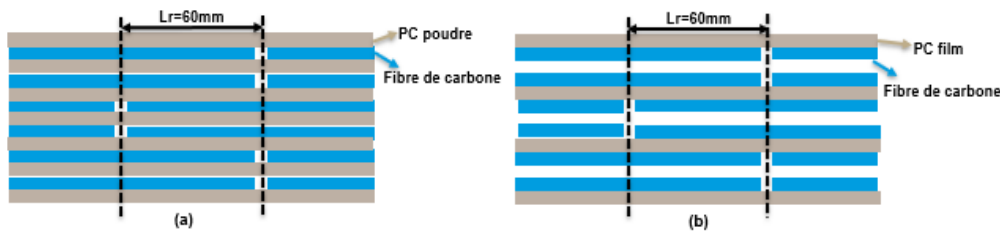


Figure3-16 Structure des plaques de composite du joint à double recouvrement (ref.6P6C avec Lr=60mm) (a) Fc/PC poudre (6P6C60-Fc/PCP) ; (b) Fc/PC film (6P6C60-Fc/PCF)

La compression des plaques 6P6C60-Fc/PCP et 6P6C60-Fc/PCF se fait en suivant un même cycle force/température (figure 3-17). Pour conserver la structure des fibres de carbone, nous avons conservé un cycle par paliers de pression.

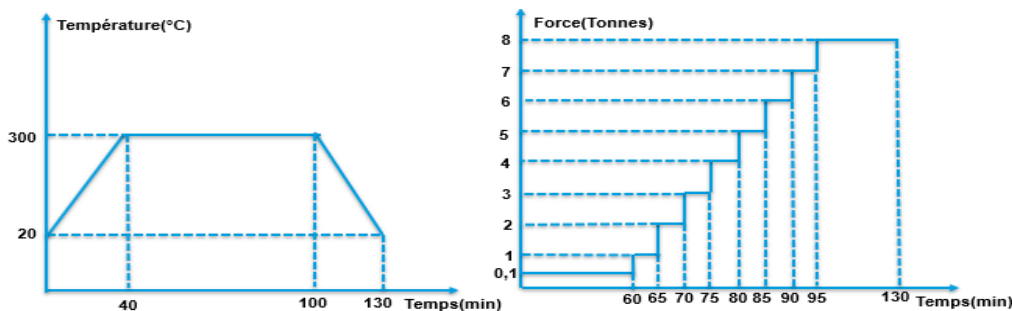


Figure 3-17 Cyclage de la force / température en fonction du temps pour former du cylindre pour les plaques 6P6C60-Fc/PCP et 6P6C60-Fc/PCF

3.4 Mesure des G_{IIC}

Les résultats des essais expérimentaux sur la résistance du composite du joint à double recouvrement (ref.6P6C avec Lr=60mm) à Fc/TP et à Fc/époxy sont rassemblés sur la figure 3-18 : on constate que la résistance des composites Fc/PC film et Fc/PA6 film est supérieure à celle du composite Fc/époxy. Par ailleurs, nous avons observé des ruptures de fibres dans la plaque du composite Fc/PC granulé lors de la mise en œuvre, ce qui explique que sa résistance soit plus faible que celle du Fc/PC film et du Fc/PC poudre.

Cependant, il est impossible de tirer des conclusions à ce stade car les conditions de mise en œuvre diffèrent d'une plaque à l'autre et donc les taux de renforts atteints ne sont pas les mêmes selon le type de matrice. Il aurait été en effet trop coûteux de rechercher pour chaque matrice les conditions permettant d'obtenir un taux de renfort visé. Aussi, nous allons normaliser les résultats pour pouvoir comparer les différentes solutions.

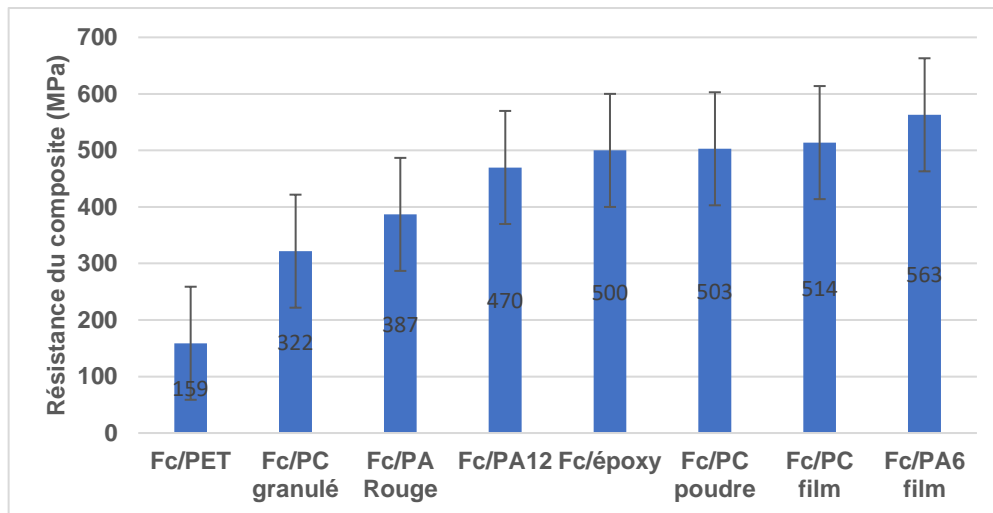


Figure 3-18 Résultats des essais expérimentaux sur la résistance du composite (ref.6P6C avec $L_r=60\text{mm}$)

3.4.1 Méthode pour calculer la fraction volumique des fibres de carbone du composite

Pour calculer la fraction volumique des fibres, on peut utiliser la formule suivante :

$$V_f = \frac{V_c}{V_c + V_r} \approx \frac{h_c}{h_T} \quad (3.1)$$

où h_c est l'épaisseur totale des fibres de carbone du composite, h_T l'épaisseur totale du composite, V_c le volume des fibres et V_r le volume de la résine.

Sachant que toutes les plaques fabriquées avaient toutes la même épaisseur de fibres de carbone on peut utiliser la relation suivante pour calculer la résistance normalisée $R_{normalisée}^{Tp}$ du composite Fc/Tp :

$$R_{normalisée}^{Tp} = \frac{V_f^{époxy}}{V_f^{Tp}} R_{Max}^{Tp} \approx \frac{h_{T(Fc/Tp)}}{h_{T(Fc/époxy)}} R_{Max}^{Tp} \quad (3.2)$$

où R_{Max}^{Tp} est résistance du composite Fc/Tp mesurée par les essais de traction.

L'ensemble des résultats expérimentaux sont rassemblés dans le tableau 3-6.

Type de la plaque	Épaisseur de la plaque (mm)	Vf (%)	Rmax-Essai (MPa)	R normalisée 66,7% de fibres (MPa)
6P6C60-Fc/époxy	1,5	66,7	500	500
6P6C60-Fc/PA6 film	1,62	60,9	563	608
6P6C60-Fc/PC film	1,74	57,5	514	596
6P6C60-Fc/PC poudre	1,77	56,5	503	594
6P6C60-Fc/PA12 poudre	1,63	61,3	470	511
6P6C60-Fc/PA rouge poudre	1,7	58,8	387	439
6P6C60-Fc/PC granulé	1,75	56,8	322	375
6P6C60-Fc/PET poudre	1,62	61,3	159	172

Tableau 3-6 Caractéristiques des plaques des composites

Il apparaît que la résistance normalisée des composites 6P6C60-Fc/PA6 film, 6P6C60-Fc/PC film et 6P6C60-Fc/PC poudre est nettement supérieure à celle du matériau de référence 6P6C60-Fc/époxy, ce qui n'est pas le cas avec les matrices PA12, PA rouge et PET. De plus, on observe que la résistance du composite 6P6C60-Fc/PC film est proche de celle du 6P6C60-Fc/PC poudre et très supérieure à celle du 6P6C60-Fc/PC granulé ce qui confirme que les « solutions film ou poudre » sont une alternative à la « solution granulé » qui génère des dégradations des fibres.

Au vu de ces résultats, nous allons poursuivre les investigations sur les composites élaborés avec les matrices PA6 film et PC film et poudre en se focalisant sur le calcul du G_{IIC} . Un des critères de choix des matrices est en effet que le G_{IIC} soit supérieur à $1,56\text{KJ/m}^2$.

3.4.2 Calcul du G_{IIC} du PA6 et du PC

Pour déterminer le G_{IIC} avec la relation (2.7) du chapitre 1, nous avons fabriqué des plaques avec des fibres continues (6PN-Fc/PA6 film et 6PN-Fc/PC) avec les conditions définies au début du paragraphe 3 (figure 3-19).



Figure 3-19 Structure du composite 6PN

Les caractéristiques des plaques composite 6PN-Fc/PA6 film et 6PN-Fc/PC sont représentées respectivement dans les tableaux 3-7 et 3-8 et les résultats des essais de traction dans les tableaux 3-9 et 3-10.

Type de la plaque	Masse des fibres (g)	Masse de résine(g)	Masse de plaque(g)	Epaisseur de plaque (mm)
6PN-Fc/PA6 film	74	52,5	100,2	1,62

Tableau 3-7 Caractéristiques de la plaque du composite 6PN-Fc/PA6 film

Type de la plaque	Masse des fibres (g)	Masse de résine(g)	Masse de plaque(g)	Epaisseur de plaque (mm)
6PN-Fc/PC film	75,1	62,5	110,9	1,74

Tableau 3-8 Caractéristiques de la plaque du composite 6PN-Fc/PC film

N° de l'éprouvette	Résistance du composite (MPa)	Module d'Young (MPa)	Module d'Young moyenne du composite (MPa)
1	1625	119940	133757
2	1673	139810	
3	1645	131109	
4	1636	129960	
5	1729	141910	
6	1673	139810	

Tableau 3-9 Résultats des essais en traction de plaque du composite 6PN-Fc/PA6 film

N° de l'éprouvette	Résistance du composite (MPa)	Module d'Young (MPa)	Module d'Young moyenne du composite (MPa)
1	1510	122070	121490
2	1536	118300	
3	1605	122680	
4	1611	125310	
5	1585	119130	
6	1573	121480	

Tableau 3-10 Résultats des essais en traction de plaque du composite 6PN-Fc/PC film

Le calcul du G_{IIC} s'appuie sur la relation (2.5) : $G_{IIC} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma^r)^2 h_2 (h_1 + h_2)}{E h_1}$. Nous pouvons donc en déduire le G_{IIC} avec le PA6 film :

$$G_{IIC} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma^r)^2 h_2 (h_1 + h_2)}{E h_1} = \frac{1}{2} \frac{(563)^2 \times 0,54 \times (0,27 + 0,54)}{133757 \times 0,27} = 1,92 \text{ KJ/m}^2 > 1,56 \text{ KJ/m}^2$$

où $\sigma^r = 563$ MPa (Tableau 3-6), $h_1 = 1,62/6 = 0,27$ mm (Tableau 3-7), $h_2 = 2 \times h_1 = 0,54$ mm et $E = 133757$ MPa (Tableau 3-9).

De la même manière, nous obtenons pour le PC :

$$G_{IIC} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma^r)^2 h_2 (h_1 + h_2)}{E h_1} = \frac{1}{2} \frac{(514)^2 \times 0,58 \times (0,29 + 0,58)}{121490 \times 0,27} = 1,89 \text{ KJ/m}^2 > 1,56 \text{ KJ/m}^2$$

Les G_{IIC} du PA6 et du PC sont donc supérieurs à $1,56 \text{ KJ/m}^2$. Ces 2 matrices Tp respectent donc le critère fixé pour le G_{IIC} .

3.5 Comparaison de la résistance du composite FCr/PA6 film, FCr/PC film avec celle du Composite FCr/époxy

Pour vérifier que le PA6 film et le PC film permettront d'augmenter la résistance du composite à fibres de carbone recyclées, on utilise des plis UD de fibres de carbone recyclées alignées pour fabriquer deux plaques FCr/PA6 film et FCr/PC film.

3.5.1 Préparation des plis du tissu de fibres de carbone recyclées alignées

La préparation des plis UD de fibres recyclées alignées exige une remise en forme des fibres selon les étapes suivantes :

- D'abord, on coupe les tissus neufs de fibres de carbone (ensimées) pour obtenir des fibres « semi-longues » de 100 à 150 mm (figure 3-19(a)) ;
- Ensuite, on aligne les fibres pour réaliser des bandes continues de 50mm de largeur à l'aide de la machine de défilage et de réalignement de fibres (figure 3-19(b)).



Figure 3-19 Remise en forme de fibres de carbone recyclées (a) « Semi-longes » de fibres de carbone de 100 à 150 mm ; (b) Bandes continues de fibres de carbone recyclées de 50mm de largeur.

Les bandes obtenues sont ensuite positionnées dans une rainure métallique (dimensions 840 mm x 150 mm) puis coupées aux dimensions 280 mm x 150 mm (figure 3-20). Les bandes sont ensuite saupoudrées de polyamide (PA6 & PA66), qui joue le rôle de liant. L'ensemble est ensuite chauffé pour fixer la forme du pli (figure 3-21). La dernière opération a été l'opération de désensimage des plis par pyrolyse (paragraphe 1.3).



Figure 3-20 1 pli du tissu de fibres de carbone recyclées alignées sans désensimage



Figure 3-21 Fixer la forme du pli de FCr (a) Pli de FCr pour fabriquer la plaquer du composite FCr/PA6 film ; (b) Pli de FCr pour fabriquer les plaques des composites FCr/PC film et FCr/époxy(A-1)

3.5.2 Résistance des plaques de composite

En suivant les cycles déjà définis pour la mise en œuvre des plaques FCr/PA6 film (figure 3-10) et FCr/PC film (figure 3-17), nous avons obtenu les caractéristiques rassemblées dans le tableau 3-11.

Type de la plaque	Masse des fibres (g)	Masse de résine(g)	Masse de plaque(g)	Température de la mise en œuvre (°C)	Force de la mise en œuvre (t)
FCr/PA6 film	63,5	44,4	90,2	300	8
FCr/PC film	69,8	48,9	113,1	300	8
FCr/époxy(A-1)	63,5	51	95,1	40	4

Tableau 3-11 Caractéristiques des plaques composites à FCr

Après la mise en œuvre, chaque plaque est découpée en 6 éprouvettes comme expliqué au paragraphe 3.1.2 du chapitre 1. Les résultats des essais de traction sur les plaques sont récapitulés dans le tableau 3-12. Ces résultats confirment que les résistances normalisées à 55% de fibres du composite FCr/PA6 film et du composite FCr/PC film sont supérieures à celle du FCr/époxy(A-1).

Type de la plaque	Epaisseur de plaque (mm)	Vf (%)	Rmax-Essai (MPa)	R normalisée avec 55% de fibres (MPa)
FCr/PA6 film	1,53	55	574,5	574,5
FCr/PC film	1,73	49	505	571
FCr/époxy (A-1)	1,65	51	466,7	503,3

Tableau 3-12 Comparaison de la résistance des différents composites à FCr

3.5.3 Influence du désensimage sur la résistance du composite de référence FCr/époxy

Dans les solutions thermoplastiques proposées, les fibres recyclées ont été au préalable désensimées. Or, pour le composite FCr/époxy qui a servi de référence à notre étude, les fibres n'avaient subi aucun traitement. L'idée est ici d'analyser l'influence du désensimage sur la résistance du composite FCr/époxy. Pour cela, on a utilisé 2 plis de tissus de fibres de carbone recyclées alignées sans pyrolyse pour fabriquer une plaque FCr/époxy(S) et la comparer avec la plaque FCr/époxy(A-2) ayant subi la pyrolyse avant sa mise en œuvre. Les résultats sont rassemblés dans les tableaux 3-13 et 3-14 et montrent que l'opération de pyrolyse a peu d'influence sur les caractéristiques mécaniques du composite époxy.

Type de la plaque	Masse des fibres (g)	Masse de résine(g)	Masse de plaque(g)	Température de la mise en œuvre (°C)	Force de la mise en œuvre (t)
FCr/époxy(S)	87	77,32	138,8	40	4
FCr/époxy(A-2)	85,7	77,32	139,6	40	4

Tableau 3-13 Comparaison des caractéristiques des plaques composites FCr/époxy (S) et FCr/époxy (A-2)

Type de la plaque	Epaisseur de plaque (mm)	Vf (%)	Rmax-Essai (MPa)	R normalisée à 43% époxy (MPa)
FCr/époxy (S)	2,3	43	380	380
FCr/époxy (A-2)	2,3	43	346	346

Tableau 3-14 Comparaison la résistance du composite FCr/époxy(S) et FCr/époxy(A-2)

3.6 Détermination de la longueur de transfert de charge (L_{TC}) du joint à double recouvrement (ref.6P6C) pour les composites Fc/PA6 film et Fc/PC film

Après avoir sélectionné 2 matrices, nous avons suivi l'évolution de la résistance des composites Fc/PA6 film et Fc/PC film en fonction de la longueur de recouvrement de 15mm à 60 mm partout pour déterminer la longueur de transfert de charge (L_{TC}) sur le joint à double recouvrement. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 3-22 et 3-23.

La longueur de recouvrement critique est identique pour les 2 matrices : $L_{TC} \approx 25$ mm. Cette longueur critique est donc supérieure à celle obtenue pour la solution de référence du composite FC/époxy ($L_{TC-époxy} = 20$ mm). Par contre, les résistances maximales obtenues, c'est-à-dire pour des longueurs de recouvrement supérieures à la longueur critique, sont supérieures à celle obtenue avec l'époxy.

En résumé, il est donc possible d'augmenter la résistance d'un composite renforcé par des fibres de carbone recyclées en choisissant des matrices PA6 et PC à condition d'augmenter la longueur de transfert de charge.

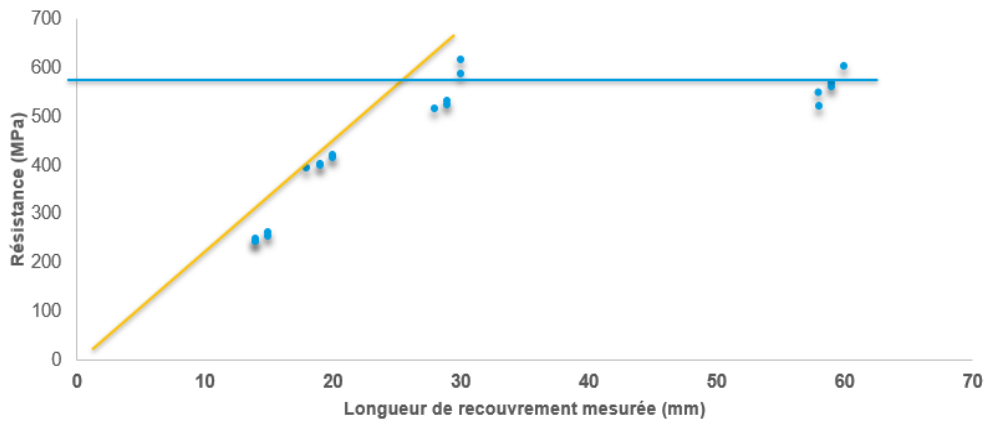


Figure 3-22 Evolution de la résistance avec la longueur de recouvrement du joint à double recouvrement (réf 6P6C) pour le composite Fc/PA6 film

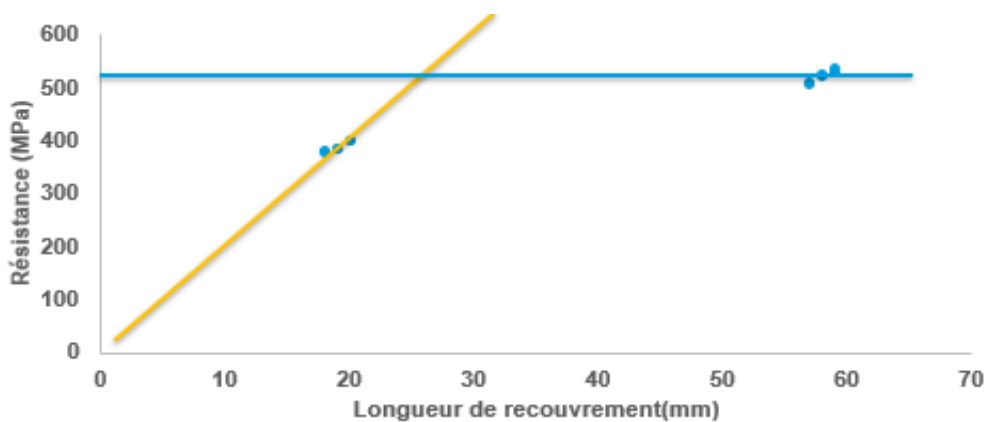


Figure 3-23 Evolution de la résistance avec la longueur de recouvrement du joint à double recouvrement (réf 6P6C) pour le composite Fc/PC film

4. Conclusion sur la mise en œuvre de matériaux composites FCr/matrice thermoplastique

Les conditions de mise en œuvre de matériaux composites FCr + matrice thermoplastique ont été étudiées. En effet les matrices thermoplastiques (par exemple le polyamide) présentent une viscosité bien plus importante que les résines thermodurcissables (par exemple la résine époxy), ce qui rend difficile l'imprégnation de préformes fibreuses. Les difficultés d'imprégnation des préformes de fibres de carbone (recyclées) peuvent avoir différentes causes : mauvaise étanchéité du moule qui permet à la matrice d'être évacuée avant imprégnation ou encore mouillabilité des fibres de carbone insuffisante. Il a été montré qu'après désensimage des fibres de carbone (par un passage au four à 500°C pendant 16 min), l'imprégnation était bien meilleure. Nous en avons donc conclu que l'ensimage des fibres (généralement époxy) ne permettait pas un bon mouillage par la matrice polyamide. Cette conclusion est très intéressante car comme les fibres recyclées ne présentent généralement plus d'ensimage, l'imprégnation de ces fibres par une matrice thermoplastique ne nécessitera donc pas de nouvel ensimage.

Ensuite les conditions de mise en œuvre ont été étudiées avec une matrice sous différentes formes (poudre, film, granulés) et différentes pressions d'imprégnation. Le choix des paramètres de mise en œuvre, bien que non optimisés, a permis d'obtenir des composites fibres recyclées / matrice thermoplastique avec des taux de fibres supérieurs à 50%, ce qui

en fait des matériaux hautes performances. Les meilleurs taux de fibres sont obtenus avec la matrice thermoplastique sous forme de film.

Plusieurs matrices thermoplastiques ont été envisagées (PA, PC, PET) sur la base de 4 critères i) viscosité faible à l'état fondu ii) G_{IIC} supérieur à G_{IIC} époxy iii) disponibilité commerciale et iv) faible impact environnemental ou disponibilité à l'état recyclé. Des plaques composites à 4 plis avec une longueur de recouvrement de 60mm ont été réalisées puis caractérisées à partir d'essais de traction. Les résultats ont ensuite été comparés à ceux d'une plaque équivalente avec matrice époxy. Il apparaît que l'utilisation d'une résine thermoplastique PA6 permet d'augmenter la résistance d'un composite d'environ 22% dans cette configuration de fibres discontinues (recouvrement unique de 60mm). Les calculs réalisés montrent effectivement que le G_{IIC} du PA6 et du PC sont supérieurs au G_{IIC} de la résine époxy, ce qui confirme les hypothèses de départ de cette thèse.

Enfin, trois plaques ont été réalisées avec de « vraies » fibres de carbone recyclées d'une longueur de 100 à 150mm réalignées par le procédé I2M (4 plis de fibres UD) et des matrices époxy, PA6 et PC. Bien que les taux de fibres avec résine thermoplastique soient légèrement plus faibles qu'avec résine époxy (en raison de la non-optimalité des paramètres de mise en œuvre), il apparaît que l'utilisation d'une résine thermoplastique PA6 ou PC permet d'augmenter la résistance d'un composite à fibres discontinues. En effet, en normalisant le taux de fibres à 55% pour toutes les matrices, l'augmentation de résistance est de l'ordre de 10% à 15% par rapport à la matrice époxy.

Ce chapitre démontre d'une part qu'il est possible d'obtenir de forts taux de fibres (>50%) en imprégnant des fibres de carbone recyclées avec une matrice thermoplastique et surtout que les caractéristiques des résines choisies ($G_{IIC} > 1,56 \text{ KJ/m}^2$) permettent d'obtenir une résistance à rupture du composite supérieure à celle obtenue avec l'utilisation d'une résine époxy. L'étude de l'imprégnation par une résine thermoplastique doit encore être poursuivie afin d'obtenir des taux de fibres équivalents à ceux de la résine époxy.

**Chapitre 4 : Performance environnementale
des matériaux composites de 2ème
génération à base de fibres de carbone
recyclées**

1. Introduction

Après avoir démontré que des matrices thermoplastiques renforcées par des fibres de carbone recyclées permettaient d'obtenir des matériaux composites avec des caractéristiques très intéressantes, l'objectif de ce dernier chapitre est de proposer des matériaux performants mais aussi à faible impact environnemental grâce à une utilisation intelligente des fibres de carbone recyclées réalignées.

Il ne s'agit plus de comparer l'impact du recyclage des fibres de carbone par rapport à la production de fibres de carbone neuves. En effet ce travail a été réalisé en profondeur [S. Pompidou et al., 2013] [M. Princaud et al., 2013 et 2014] et est naturellement favorable à la fibre de carbone recyclée. En effet, pour apporter un gain de performances techniques, la fibre de carbone recyclée ne se substituera pas à la fibre de carbone vierge. En revanche, la substitution de fibres de verre ou d'alliage léger par de la fibre de carbone recyclée réalignée sur des produits sollicités mécaniquement peut entraîner à la fois de meilleures performances et une diminution de l'impact environnemental.

2. Reconception d'un produit en intégrant des fibres de carbone recyclées

2.1 Contexte

Comme dans toute analyse environnementale, la comparaison des impacts environnementaux sera faite sur la base d'une unité fonctionnelle. Il s'agit de mesurer les impacts environnementaux d'une pièce dite « classique » et de son homologue réalisée avec des fibres de carbone recyclées réalignées à fonction égale.

Il a été montré lors de travaux antérieurs, [Y. Li et al., 2017] [P. Feraboli et al., 2010] qu'à rigidité égale, une pièce métallique ou en composite à fibres de verre pouvait voir sa masse fortement diminuée grâce à l'utilisation de fibres de carbone recyclées et alignées avec un agencement (empilement des plis) étudié. Dans le cadre de ce travail, nous étudions des nouveaux matériaux composites à fibres de carbone recyclées et matrice thermoplastique. L'usage du thermoplastique apportera 2 avantages supplémentaires : i) offrir une résistance à rupture améliorée par rapport à une matrice époxy et ii) diminuer encore l'impact environnemental en utilisant des matrices thermoplastiques recyclées.

Un produit (utile pour le développement durable) actuellement réalisé en alliage léger ou composite à fibres de verre servira de base de comparaison par rapport au nouveau produit de même fonction redimensionné pour l'utilisation des fibres de carbone recyclées réalignées.

Nous avons choisi d'étudier une pale d'éolienne portable ; ce type d'éolienne permet la production d'énergie domestique sur un bateau par exemple ou se substitue à un groupe électrogène pour puiser ou dessaler de l'eau dans n'importe quel endroit de la planète. Comme il s'agit d'éoliennes portables, le gain de masse est crucial.

2.2 Bases de la comparaison : pale d'éolienne portable

Le produit ciblé est une éolienne transportable, de 500W-48V (figure 4-1) qui produit une puissance nominale de 500W dans des vents de vitesse 12m/s (condition de raideur) et doit pouvoir supporter des vents jusqu'à 45m/s (condition de non rupture).



Figure 4-1 Eolienne portable 400W à 500W (photo éolienne shop)

Les pales de ce type d'éolienne ont une longueur de 600 mm avec une largeur comprise entre 35mm et 120mm. Actuellement, elles sont réalisées en alliage léger (alliage d'aluminium) ou en composite fibres de verre/résine polyester. Nous allons envisager les gains possibles en remplaçant ces matériaux par des composites à fibres de carbone recyclées.

Le procédé d'obtention de la pale en alliage léger est l'emboutissage et la compression à chaud pour la pale en matériau composite à fibres de verre.

2.3 Efforts exercés par le vent sur une pale d'éolienne

La géométrie (simplifiée) est inspirée des pales d'une éolienne domestique de 500 W (figure 4-2).



Figure 4-2 Pale d'éolienne domestique 500W

La pale sera assimilée à une plaque plane de forme trapézoïdale, vrillée selon son axe pour ajuster l'angle d'incidence. Ses dimensions sont présentées sur la figure 4-3.

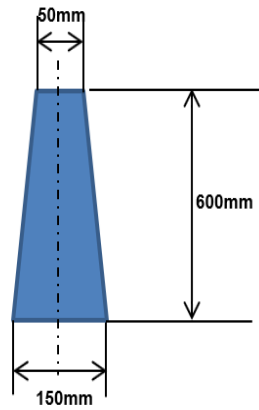


Figure 4-3 Dimensions schématiques d'une pale d'éolienne portable 500W

L'éolienne comporte 5 pales. Ces pales sont liées à un moyeu de diamètre $D_m=150\text{mm}$. Le diamètre total de l'éolienne est alors $D=1350\text{mm}$.

On fait l'hypothèse que le moyeu est relié directement au générateur, qui fournit sa puissance nominale pour une vitesse de 800 tr/min lors d'une vitesse du vent de $v=12\text{ m/s}$.

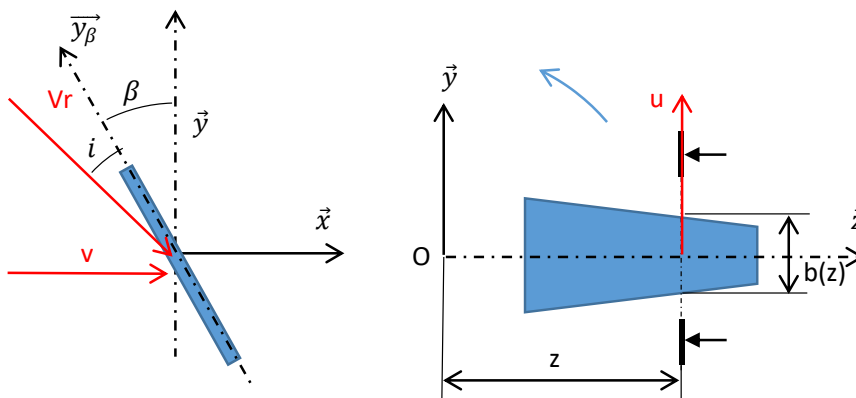


Figure 4-4 Angles formés par la pale

On note $O\vec{x}$ l'axe de rotation de la pale, la vitesse du vent est notée v . La vitesse tangentielle de la pale est notée u ($u = z \cdot \omega$). La vitesse relative du vent par rapport à la pale est notée V_r .

L'angle d'attaque α est composé de la somme de l'angle d'incidence i et de l'angle de calage β des pales (eq. 4.1). L'angle de calage est l'angle formé par la pale et le plan de rotation de la pale. L'angle d'incidence est l'angle formé par la pale et la direction apparente du vent. Comme la vitesse tangentielle de la pale augmente en s'éloignant du centre de rotation, l'angle de calage est ajusté afin que l'angle d'incidence reste constant.

La limite de Betz indique que la puissance théorique maximale récupérable par une éolienne est égale à $16/27$ de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne ; cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne ; ce qui signifie que la puissance maximale récupérable est obtenue lorsque la vitesse du vent en sortie d'éolienne est égale à $1/3$ de la vitesse en entrée

Dans notre cas, on utilisera par la suite une vitesse de vent relative V_r en considérant une vitesse de vent égale à $2/3 v$ (eq. 4.2).

$$\alpha = \beta + i = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (4.1)$$

$$V_r = \sqrt{\frac{4}{9}v^2 + u^2} \quad (4.2)$$

On obtient alors la géométrie représentée figure 4-5 pour une pale :



Figure 4-5 Géométrie d'une pale

Dans le cas d'une plaque plane inclinée, la force normale (F_n) a pour expression :

$$F_n = C_n \frac{1}{2} \rho V_r^2 \cdot S \quad (4.3)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air, et C_n un coefficient dépendant de l'angle d'incidence. Ce coefficient est estimé d'après des mesures expérimentales [B.H. Wick, 1954].

Pour un angle d'incidence de 6° , $C_n=0,7$. Le centre de pression est situé à 28% de la longueur du profil, à partir du bord d'attaque [B.H. Wick, 1954].

Ces relations permettent de déterminer l'angle de calage de la pale, la vitesse relative dans les conditions nominales, puis le champ de pression $p(s)$. Le champ de pression évolue linéairement selon y , et est ajusté afin de respecter :

$$\frac{1}{b(z)} \int_0^{b(z)} p(s) ds = C_n \frac{1}{2} \rho V_r^2 \quad (4.4)$$

$$\int_0^{b(z)} (s - s_c) p(s) ds = 0 \quad (4.5)$$

$$\text{Où } s_c = 0.28 b(z) \quad (4.6)$$

De plus, la pale est soumise à une densité de force (\vec{f}) dans la direction \vec{z} (qui s'avère négligeable)

$$\vec{f} = \rho z \omega^2 \vec{z} \quad (4.7)$$

Le résultat du calcul donne une valeur de moment sur l'axe \vec{x} de 1,166 N.m. Avec 5 pales et une vitesse de rotation de 800 tours/min, cela correspond à une puissance mécanique de 488 W.

2.4 Dimensionnement d'une pale d'éolienne en fonction du matériau

Les dimensions étant fixées, et le champ de pression connu, il reste donc à rechercher l'épaisseur de la pale qui est considérée uniforme.

Le cahier des charges :

- La flèche en bout de pale ne dépasse pas 1% de la longueur de pale (6 mm) ;
- La déviation angulaire (rotation autour de \vec{z}) en bout de pale ne doit pas excéder 1° (incidence (i) maxi 7°) ;
- Dans le cas d'un vent très fort ou d'une rafale (45 m/s), la pale ne doit pas casser. On suppose que la vitesse de rotation de l'éolienne est inchangée (régulation grâce au générateur). Le terme $\frac{2}{3}v$ est remplacé par v_{max} dans le calcul du vent relatif. L'angle d'incidence sera supposé inchangé (ce qui constitue une hypothèse conservative). On s'assurera ici de la non rupture de la pale, avec un coefficient de sécurité $s=2$.

La conception de référence est une pale en alliage léger. Le calcul de la flèche est effectué avec le logiciel CATIA. L'épaisseur de pale est un multiple de 0,1 mm. Pour la modélisation, la pale est maillée avec des éléments de coque quadratiques (609 éléments de 10x10 mm²). Le bord inférieur est lié à l'origine du repère avec des éléments rigides (figure 4.6).



Figure 4-6 Maillage de la pale (CATIA)

Les caractéristiques des matériaux utilisés sont résumées dans le tableau 4.1 :

	Alliage léger	UD FV/EP	UD 51% FCr/EP	UD 55% FCr/EP	UD 55% FCr/PA
E1 (MPa)	70000	45000	102823	111487	110010
E2 (MPa)	70000	12000	7359	7791	7301
R _{p0,2} (MPa)	80				
Rm (MPa)	170	1250	550		
ν_{12}	0,34	0,3	0,53	0,53	0,54
G ₁₂ (MPa)	26119	4500	4935	5363	5052
Epaisseur pli (mm)		0,14	0,654	0,606	0,606
ρ (kg.m ⁻³)	2760	2080	1455	1483	1503

Tableau 4-1 Caractéristiques des matériaux des pales d'éoliennes

a) Dimensionnement de la pale alliage léger

Le calcul de la pale en alliage léger donne une épaisseur de 5,9 mm, la flèche en bout de pale à vitesse nominale (12m/s) est alors de 5,84 mm, la rotation atteint 0,1°. La contrainte de Von Mises maximale est atteinte en pied de pale et est de 14,8 MPa.

Avec un vent de 45 m/s, la contrainte maximale s'élève à 25,6 MPa (en considérant que la vitesse de rotation est toujours la même, donc la vitesse tangentielle n'évolue pas), ce qui donne un coefficient de sécurité de 6,6.

b) Dimensionnement de la pale composite fibres de verre

La pale étant majoritairement sollicitée en flexion, le moment de torsion est faible. En conséquence, il semble judicieux d'utiliser un empilement à 0° pour les fibres renforçant les composites (que ce soit FV ou FCr). Les propriétés mécaniques de l'UD verre époxy sont extraites de la littérature [D. Gay et al., 1997].

Le calcul de la pale composite fibres de verre (FV/EP) donne 49 plis (soit une épaisseur de 6,86 mm). La flèche en bout de pale à vitesse nominale (12m/s) est de 5,92 mm, avec une rotation en bout de pale inférieure à 0,06°. Le niveau de contrainte maximal sens longitudinal est de l'ordre de 7 MPa.

Avec un vent de 45 m/s, la contrainte maximale s'élève à 17 MPa, soit un coefficient de sécurité de 73,5.

c) Dimensionnement de la pale composite Fibres de carbone recyclées / époxy

Les propriétés mécaniques de l'UD carbone recyclé/époxy sont extraites de la bibliographie [A. Gillet et al., 2014]. Avec 8 plis FCr/EP (soit une épaisseur de 5,2 mm), la flèche en bout de pale est de 5,9 mm. La rotation en bout de pale est de 0,08°. Le niveau de contrainte maximal sens longitudinal est de l'ordre de 13 MPa.

Avec un vent de 45 m/s, la contrainte maximale s'élève à 29,2 MPa, soit un coefficient de sécurité de 18,8.

d) Dimensionnement de la pale composite Fibres de carbone recyclées / polyamide thermoplastique

Les propriétés du composite FCr/PA doivent être estimées car nous manquons de données. Pour évaluer les propriétés d'un composite FCR/PA6, on va utiliser l'analogie avec un stratifié [Y. Li et al., 2017] [P. Feraboli et al., 2010]. Le désalignement est pris en compte en considérant une distribution d'orientation gaussienne (écart type = 8°, valeur conservative [G. Oliveux et al., 2017]).

Les propriétés d'un pli UD à renfort discontinu sont évaluées avec le modèle de Halpin Tsai [J.C. Halpin, 1969] [J.C. Halpin et al., 1976].

$$\frac{\bar{P}}{P_m} = \frac{1 + \xi \eta f}{1 - \eta f} \quad (4.8)$$

$$\text{Avec } \eta = \left(\frac{P_f}{P_m} - 1 \right) / \left(\frac{P_f}{P_m} + \xi \right) \quad (4.9)$$

$$\xi_{E11} = 2 \left(\frac{L}{d} \right) ; \xi_{E22} = 2 ; \xi_{G12} = 1 \quad (4.10)$$

où \bar{P} est un module du composite, P_f et P_m sont respectivement les modules fibre et matrice correspondants, ξ est le rapport d'élancement dans la direction considérée et f est le taux volumique de renfort. Ici, la valeur du terme ξ_{E11} est fixée arbitrairement à 150.

Les propriétés retenues pour les constituants sont résumées dans le tableau 4-2 :

	FCr	Résine époxy	Thermoplastique PA6
E_{11} (MPa)	230000	3500	3100
E_{22} (MPa)	15000		
ν_{12}	0,2	0,4	0,39
G_{12} (MPa)	15000		
ρ (kg.m ⁻³)	1800	1096	1140

Tableau 4-2 Propriétés des FCr et matrice

Expérimentalement, on évalue le taux de renfort des plaques FCr/EP à 51% et celui des plaques FCr/PA6 à 55% (essentiellement en raison des pressions de compaction différentes). Les propriétés estimées des plis en fonction du taux de renfort (en considérant des préformes de 600 g/m²) ont été reportées dans le tableau 4-1. Les résistances en traction sont estimées à partir des essais présentés au chapitre 3 (tableau 3-12).

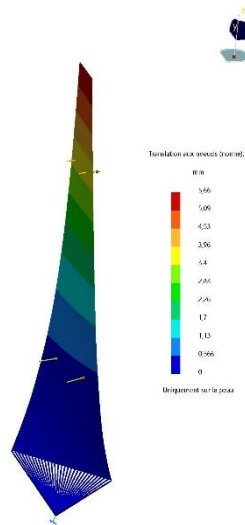


Figure 4-7 Norme du déplacement (CATIA), pale composite FCr/EP

Les performances des trois solutions sont récapitulées dans le tableau 4-3.

	Alliage léger	Composite UD FV	Composite UD 51%FCr/EP	Composite UD 55%FCr/EP	Composite UD 55% FCr/PA
Nombre de plis	-	49	8	9	9
Epaisseur (mm)	5,9	6,86	5,232	5,454	5,454
Fleche (mm)	5,84	5,92	5,86	4,77	4,84
Rotation en bout de pale	0,1°	0,06°	0,08°	0,07°	0,07°
Masse (g)	959	856	457	485	492
Résistance (MPa)	170	1250	550	500	570
Contrainte max (MPa)	25,6	17	29,2	27	27
Coefficient de sécurité	6,6	73,5	18,8	18,5	21

Tableau 4-3 Performances des pales d'éoliennes en fonction des matériaux utilisés

En conclusion du dimensionnement, il apparaît que le composite avec fibres de carbone recyclées est un matériau performant pour des pièces structurales sollicitées en flexion et dimensionnées en raideur. Dans le cas présenté ici, la réduction de masse obtenue avec FCR/EP est de 49% par rapport à l'aluminium et 43% par rapport à FV/EP. L'utilisation d'une matrice thermoplastique n'apporte pas, dans ce cas, d'amélioration de performance

technique car le niveau de contraintes mécaniques dans une pale de petite éolienne est très faible.

3. Scénarios de fabrication des pales d'éolienne portable

3.1 Hypothèses et pistes d'étude

L'objectif de ce chapitre n'est pas simplement de montrer que le composite à fibres de carbone recyclées peut diminuer l'impact environnemental d'un produit mais plutôt de choisir l'association fibre/matrice qui permette le meilleur rapport performances techniques / impact environnemental. Des choix de développement du matériau restent à faire (type d'architecture fibreuse, type de matrice, méthode et paramètres de mise en œuvre) et ces choix seront pilotés par la minimisation de l'impact environnemental global.

3.1.1 Hypothèses

Au départ de ce travail il est important de rappeler que des choix ont déjà été réalisés afin de minimiser l'impact environnemental des fibres de carbone recyclées :

- Hypothèse de baser la filière sur la collecte de déchets industriels chez les grands constructeurs aéronautiques (Airbus, Dassault, Safran, Aircelle, Airbus Helicopter, ...). Cette hypothèse est également celle du projet Européen H2020 MANIFICA qui s'est fixé comme objectif de développer la filière à l'échelle industrielle en France.
- Hypothèse de tri à la source, réalisé directement par le générateur de déchet. Cette hypothèse permet de garantir une séparation des fibres de carbone par type (haut module, haute résistance.) et par type de résine (époxy, phénolique, polymérisée ou non, thermoplastique...) afin d'une part de maximiser la qualité des fibres recyclées et d'autre part d'assurer la traçabilité du matériau futur.
- Utilisation de procédés de séparation fibres/matrice efficaces, efficaces et disponibles : la solvolysse supercritique ou la vapo-thermolyse.
- Utilisation (pour 30% à 50%) de déchets de fibres sèches ne nécessitant pas de séparation fibres/matrice. Ces déchets (tow-ends) sont présents en grande quantité (au moins 50t/an) en France, notamment chez les producteurs de fibres de carbone (Toray, Hexcel) et chez les fabricants du domaine aéronautique et spatial qui réalisent de l'enroulement filamentaire ou de la pultrusion (Safran, Ariane Group, Epsilon composites...).
- Un très bon réalignement ($\pm 10^\circ$) des fibres de carbone recyclées grâce au procédé I2M et des fibres recyclées discontinues mais longues (50mm – 250mm) afin de réaliser des composites « hautes performances ». Ainsi il est possible de satisfaire une unité fonctionnelle en utilisant une faible quantité de matière.
- Un procédé de réalignement (différent du cardage) qui évite la casse de fibres de carbone, ce qui permet i) de garantir la longueur des fibres et ii) d'éviter la génération de fibrilles proches des fibres d'amiante qui apporteraient d'importants risques HSE.
- La conservation de fibres recyclées longues permet d'envisager des recyclages multiples des fibres de carbone, améliorant encore l'impact environnemental de ces matériaux.

3.1.2 Pistes spécifiques à cette étude pour minimiser l'impact environnemental

Il s'agit ici d'utiliser l'analyse environnementale pour fixer les degrés de libertés restant à notre disposition sur le développement de ce nouveau matériau. Les éléments à confirmer/infirmes sont :

- L'utilisation d'une matrice thermoplastique avec les fibres de carbone recyclées afin d'augmenter la résistance spécifique du nouveau matériau composite, pour permettre de diminuer encore la quantité de matière nécessaire également dans les applications où une résistance spécifique du matériau est requise.
- La matrice thermoplastique, bien que mise en œuvre à plus haute température qu'une matrice thermodurcissable, demande des temps de cycle beaucoup plus courts : nous devons valider quelle association temps/température de mise en œuvre conduit à une minimisation de l'impact environnemental.
- L'utilisation d'une matrice thermoplastique disponible à l'état recyclé devrait apporter une diminution significative et complémentaire de l'impact environnemental du composite.
- Une partie des composites à fibres recyclées et matrice thermoplastique pourrait également utiliser une voie de recyclage simplifiée : broyage et injection de « compounds » en thermoplastique renforcé fibres de carbone.

3.2 Scénarios d'analyse environnementale

3.2.1 Unité fonctionnelle

Nous proposons de calculer l'impact environnemental d'une pale d'éolienne portable 500W (qui compte 5 pales) en fonction du matériau utilisé. L'unité fonctionnelle sera alors une pale d'éolienne résistant à des vents de 45m/s, utilisable entre -30°C et +45°C, également en milieu marin, avec une durée de vie de 5 ans en plein soleil.

3.2.2 Scénario 1 « pale alliage d'aluminium »

La réalisation d'une pale d'éolienne en alliage léger demande les étapes suivantes : (figure 4-8).

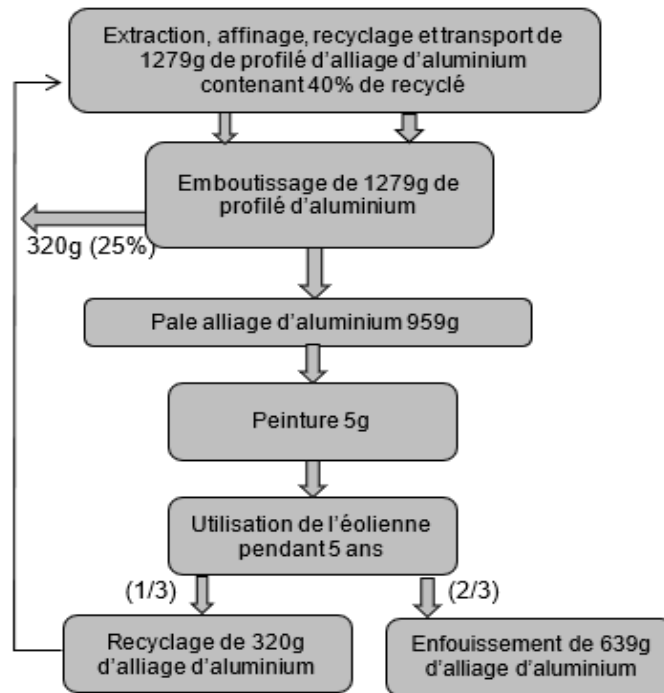


Figure 4-8 Scénario 1, analyse environnementale d'une pale d'éolienne portable en alliage d'aluminium

Hypothèses du scénario 1 :

- 1279g d'alliage léger est mis en œuvre pour extruder et emboutir une plaque de 959g, (taux de perte 25%).
- La pièce est fabriquée en France, les 1279g d'alliage léger proviennent à 60% d'alliage d'aluminium neuf et 40% d'alliage recyclé.
- Les chutes de production d'alliage léger sont recyclées à 100%.
- Pour résister au milieu marin pendant 5 ans, la pale nécessite une peinture époxy.
- La pale en alliage léger pourrait probablement être utilisée sur une durée supérieure à 5 ans mais nécessiterait un reprofilage et une nouvelle peinture ; ce n'est pas pris en compte dans cette étude qui fait l'hypothèse d'une durée de vie de 5 ans pour toutes les pales, quel que soit le matériau.
- En fin de vie, la pale usagée intègre la filière de recyclage de l'alliage léger avec une probabilité de 1/3 (taux de recyclage de l'alliage léger en France – pales cassées et perdues).
- Les 2/3 de fin de vie « restant » sont considérées enfouies.

3.2.3 Scénario 2 « pale composite fibres de verre »

La réalisation d'une pale d'éolienne en composite monolithique fibres de verre/résine polyester (avec un taux massique de fibres de verre de 60%) demande les étapes suivantes : (figure 4-9)

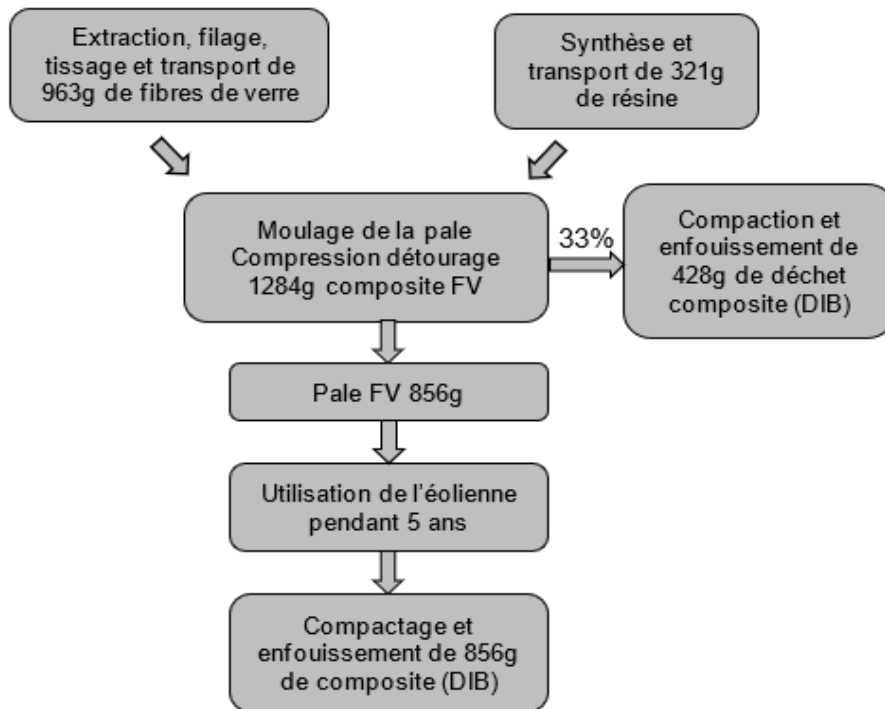


Figure 4-9 Scénario 2, analyse environnementale d'une pale d'éolienne portable en composite fibres de verre monolithique

Hypothèses du scénario 2 :

- 1284g de composite FV sont nécessaires pour obtenir une pale composite de 856g (taux de chute 1/3).
- 963g de tissu de fibres de verre et 321g de résine polyester sont nécessaires pour obtenir 1284g de composite fibres de verre dans la pale.
- Le procédé de mise en œuvre de composites utilisé est la compression en moule fermé.
- 428g de déchets de production composites (secs ou polymérisés) sont générés par le procédé de compression (taux de chute 1/3).
- Le scénario choisi pour l'élimination des déchets composites (déchet de production et fin de vie) est le broyage + enfouissement comme DIB, en l'absence de filière organisée actuellement en France.

3.2.4 Scénario 3 « pale composite fibres de carbone recyclées et matrice thermodurcissable »

La réalisation d'une pale d'éolienne avec des fibres de carbone recyclées suit les étapes suivantes : (figure 4-10)

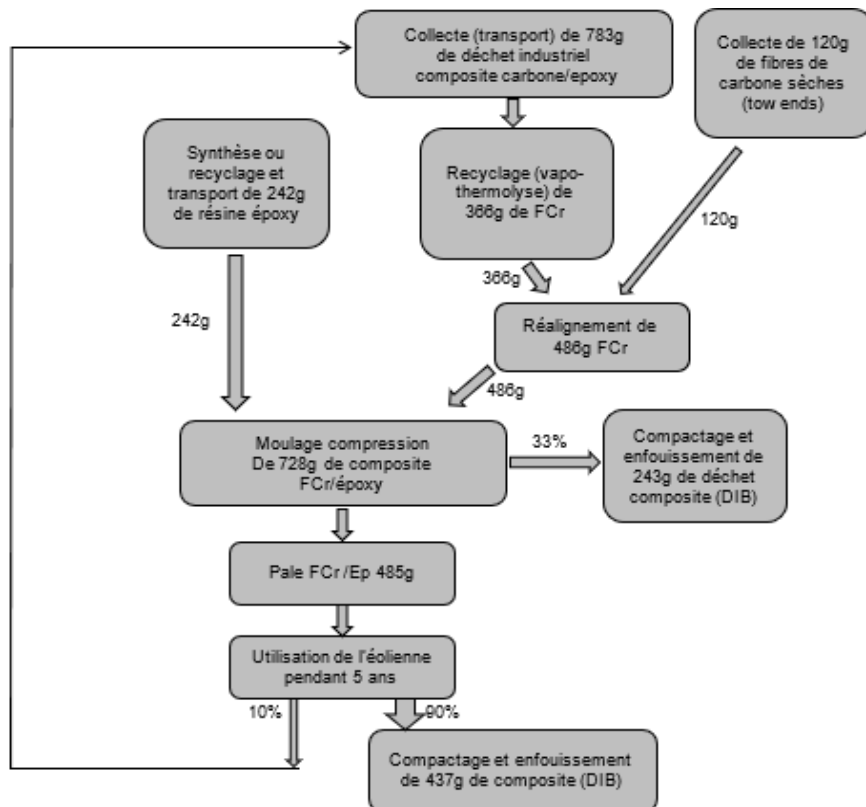


Figure 4-10 Scénario 3, analyse environnementale d'une pale d'éolienne portable en fibres de carbone recyclées + résine époxy

Hypothèses du scénario 3 :

- Les fibres de carbone recyclées proviennent à 75% de vapo-thermolyse de déchets de production composites et à 25% de chutes de fibres sèches (tow-ends). L'ensemble étant collecté chez les producteurs de la filière aéronautique.
- Il faut collecter et traiter par vapo-thermolyse 2,14t de déchet composite pour extraire 1t de fibres de carbone recyclées, ainsi la collecte de 783g de déchet composite FC est nécessaire à la production de 486g de FCr.
- 728 g de composite FCr sont mis en œuvre pour obtenir une pale composite de 485g (taux de chute 1/3).
- 486g de FCr réalignées et 242g de résine époxy sont nécessaires pour obtenir 728g de composite FCr.
- Le procédé de mise en œuvre de composites utilisé est la compression en moule fermé à 40°C pendant 3h.
- 243g de déchets de production composites (secs ou polymérisés) sont générés par le procédé de compression (taux de chute 1/3).
- Le scénario choisi pour l'élimination des déchets composites carbone (déchet de production et fin de vie) est à 90% le broyage + enfouissement comme DIB, et à 10% l'intégration de la filière de recyclage du projet MANIFICA (filiale en démarrage).

3.2.5 Scénario 4 « pale composite fibres de carbone recyclées et matrice thermoplastique »

La réalisation d'une pale d'éolienne avec fibres de carbone recyclées avec matrice thermoplastique (PA) exige les étapes suivantes : (figure 4-11)

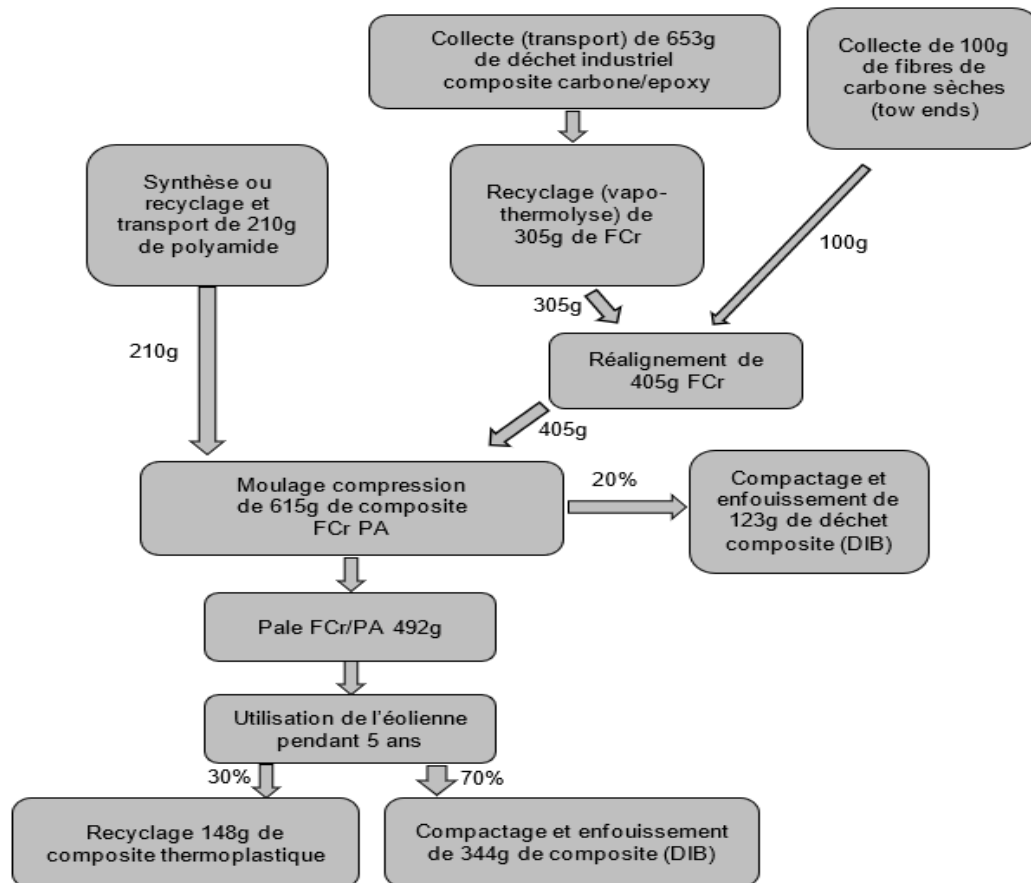


Figure 4-11 Scénario 4, analyse environnementale d'une pale d'éolienne portable en fibres de carbone recyclées et matrice thermoplastique

Hypothèses du scénario 4 :

- Les fibres de carbone recyclées proviennent à 75% de vapo-thermolyses de déchets de production composites et à 25% de chutes de fibres sèches (tow-ends). L'ensemble étant collecté chez les producteurs de la filière aéronautique.
- Il faut collecter et traiter par vapo-thermolyses 2,14t de déchet composite pour extraire 1t de fibres de carbone recyclées ainsi, il faut collecter 653g de déchets composites FC pour générer 305g de FCr après vapo-thermolyses.
- 615 g de composite FCr sont mis en œuvre pour obtenir une pale composite de 492g (taux de chute 1/3).
- 405g de FCr réalignées et 210g de résine polyamide (PA) sont nécessaires pour obtenir 615g de composite FCr.
- Le procédé de mise en œuvre de composites utilisé est la compression en moule fermé à 300°C pendant 10 min.
- 123g de déchets de production composites (secs ou polymérisés) sont générés par le procédé de compression (taux de chute 20%).
- Le scénario choisi pour l'élimination des déchets de production composites carbone est le broyage + enfouissement comme DIB.
- En fin de vie, les pales hors d'usage pourront à 30% être recyclées par extrusion thermoplastique (production de granulés thermoplastiques chargés FC pour injection) ou à 70% être éliminées comme DIB par broyage + enfouissement. En effet l'intégration de la filière de recyclage du projet MANIFICA n'est pas encore possible pour les composites à matrice thermoplastique.

4. Données environnementales

Nous allons comparer les impacts environnementaux des pales d'éoliennes en fonction du matériau utilisé. Les critères principaux pour analyser l'impact environnemental des résines sont les suivants :

- Consommation d'énergie pour la production de 1kg de résine ;
- Equivalent CO₂ pour la production de 1kg de résine.

4.1 Impact de la résine époxy

L'époxy est une résine très courante utilisée pour produire des matériaux composites à renfort fibres de carbone. La production de l'époxy liquide est basée sur l'épichlorhydrine (ECH). L'épichlorhydrine (ECH) a été fabriquée par le propylène ou le glycérol. Pour faire l'étude de l'impact environnemental la limite du système a été définie en prenant en compte les matières premières, la production, le transport, l'application et le recyclage et l'ACV a été réalisée sur la base des ISO (ISO14040 2006 ; ISO14044 2006) [V. Kočí et al., 2019]. L'unité fonctionnelle de cette ACV est la production de 1Kg de la résine époxy liquide (REL) qui a été produite par le propylène (REL-P) ou le glycérol (REL-G) (figure 4-12).

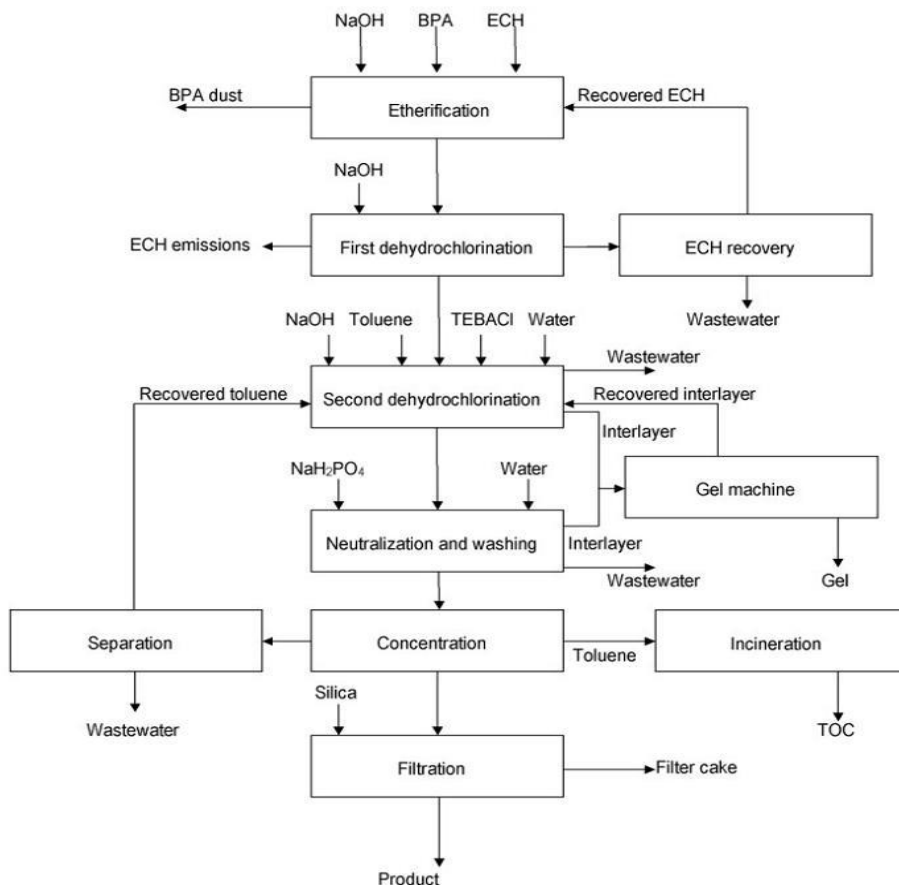


Figure 4-12 Schéma des impacts de la production de résine époxy liquide [V. Kočí et al., 2012]

Les résultats de l'analyse du cycle de vie (ACV) de la production de 1kg de la résine époxy sont résumés dans le tableau 4-4.

Matériau (extraction)		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
Résine Epoxy	Litt.	91-100		CES Grantadesign
		103 (RELG)	4.6	[K. Vladimír et al., 2012]
		146 (RELP)	8.7	[K. Vladimír et al., 2012]
		76-144	4,7-8	[R.J. Tapper et al., 2020]

Tableau 4-4 Impact environnemental de la production de 1kg de résine époxy

4.2 Impact du poly téréphtalate d'éthylène (PET)

Aujourd'hui, l'application du PET est très importante dans le domaine de l'emballage, notamment dans le domaine des bouteilles transparentes obtenues par injection soufflage [W. Genz, 2007]. En Europe, les déchets des bouteilles en PET ont été augmentés de 0,2Mt en 1998 à 1,26Mt en 2008 [Petcore, 2009]. En plus, environ 40% des déchets des bouteilles en PET sont collectés pour le recyclage depuis 2009 [PlasticsEurope, 2009] et il est prévu que la collecte des déchets des bouteilles en PET en Europe continuera d'augmenter de 10% par an. Ainsi ce polymère présente une grande disponibilité à l'état recyclé [W. Glenz, 2007]. Pour étudier les impacts environnementaux de la fibre PET recyclée par rapport au PET vierge, la méthode « cut-off » a été utilisée pour définir la limite du système de l'évaluation du cycle de vie du PET (figure 4-13) [S. Li et al., 2010].

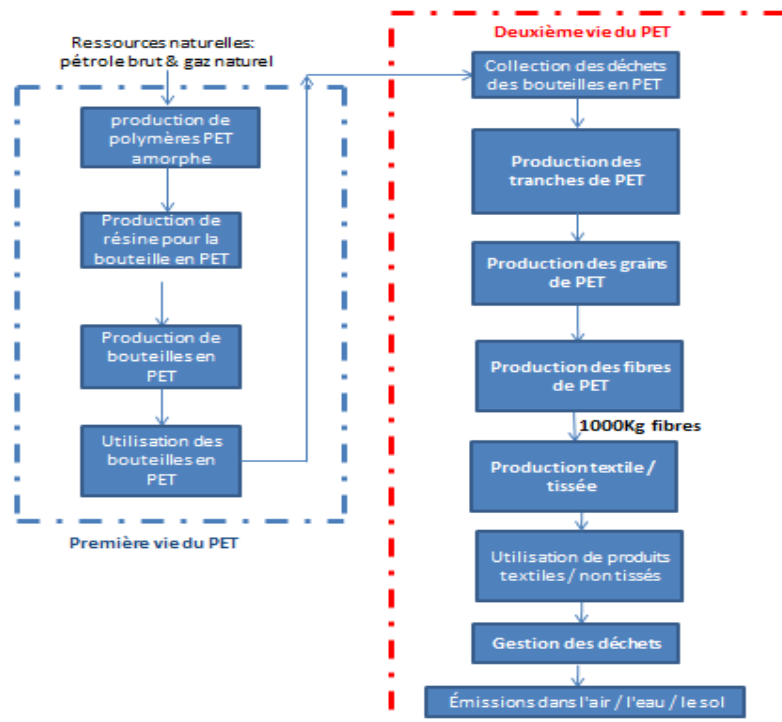


Figure 4-13 Cadre de l'analyse du cycle de vie du PET par la méthode « cut-off » [S. Li et al., 2010]

Sur la figure 4-13, il apparaît que la première vie du PET et la seconde vie du PET sont découpées en deux systèmes de produits indépendants par la méthode « cut-off ». Sur le principe du cut-off, les bouteilles usagées pendant la première vie sont considérées comme des déchets, donc le début de la seconde vie du PET a été défini comme la collecte et le transport des bouteilles PET usagées. Les résultats de l'ACV sont résumés dans le tableau 4-5.

Matériau (extraction)		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
PET	Litt.	95	4,06	[S. Li et al., 2010]
PET recyclé	Litt.	13	0,96	[S. Li et al., 2010]

Tableau 4-5 Résultat de l'ACV pour 1kg de fibre PET recyclée et 1kg de fibre PET vierge

4.3 Polycarbonate (PC)

Le polycarbonate est un polymère thermoplastique cristallin présentant une résistance et une ténacité élevées, ce qui en fait un bon candidat pour des matrices de composites hautes performances. Le polycarbonate est généralement fabriqué par réaction du phosgène avec du bisphénol-A. Le phosgène est fabriqué par réaction entre le chlore et le monoxyde de carbone. Le bisphénol-A est fabriqué par réaction entre le phénol et l'acétone. La figure 4-14 récapitule la production du polycarbonate (PC) [I. Boustead, 2005].

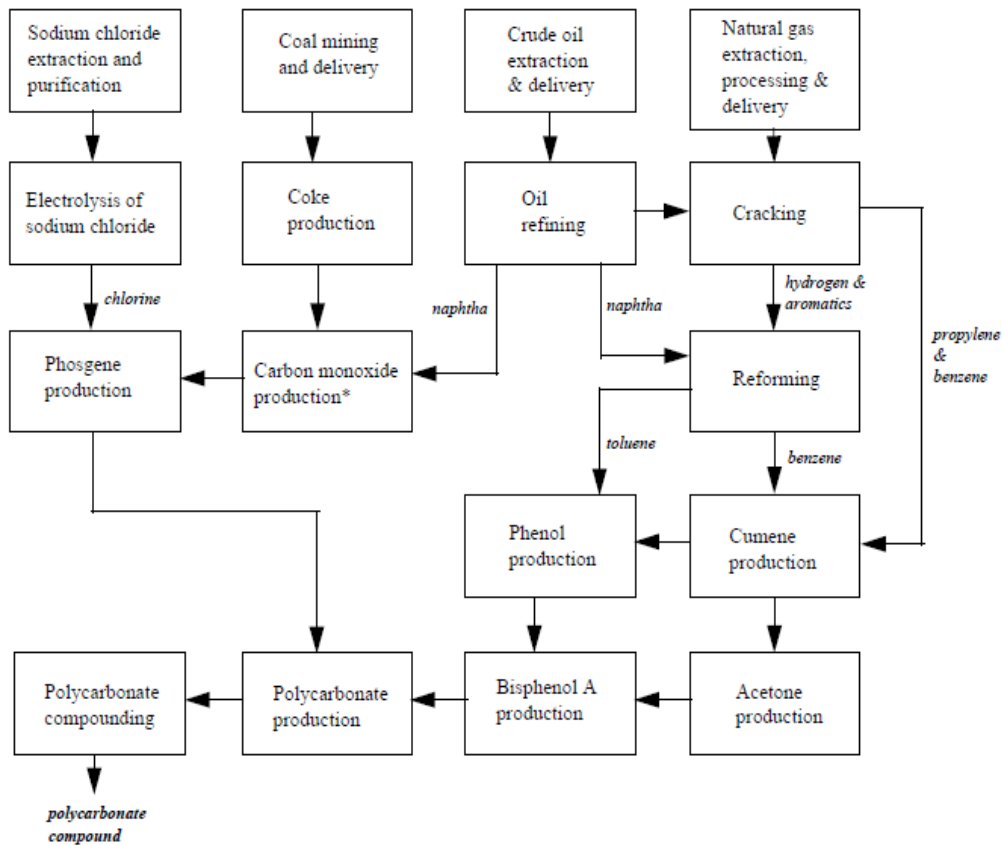


Figure 4-14 Schéma sur la production du polycarbonate (PC) vierge [I. Boustead, 2005]

L'impact environnemental du PC recyclé n'a pas pu être déterminé ; nous avons choisi la valeur de 26MJ/kg qui est intermédiaire entre l'impact du PET recyclé et l'impact du PA6 recyclé. Le tableau 4-6 récapitule l'impact environnemental de la production de 1 kg de polycarbonate.

Matériau (extraction)		MJ/kg	Kg CO2/kg	Source
PC	Litt.	113	7.6	[I. Boustead, 2005]
PC recyclé		26	3,8	

Tableau 4-6 Impact environnemental pour produire 1 kg de polycarbonate vierge

4.4 Polyamide (PA)

Il existe plusieurs types de polyamide (PA 6 ; PA 6.6, PA11, PA12, ...).

Polyamide 6 (PA6)

Le polyamide 6 (PA6) est un polyamide avec une très bonne résistance à la traction. La société Aquafil Groupe a démarré la production de PA6 dès 1970 et puis elle a développé le système ECONYL® pour le recyclage du PA6 de 2007 à 2011. L'ACV du PA6 réalisée par Aquafil Groupe est présentée sur la figure 4-15 [Aquafil, 2014].

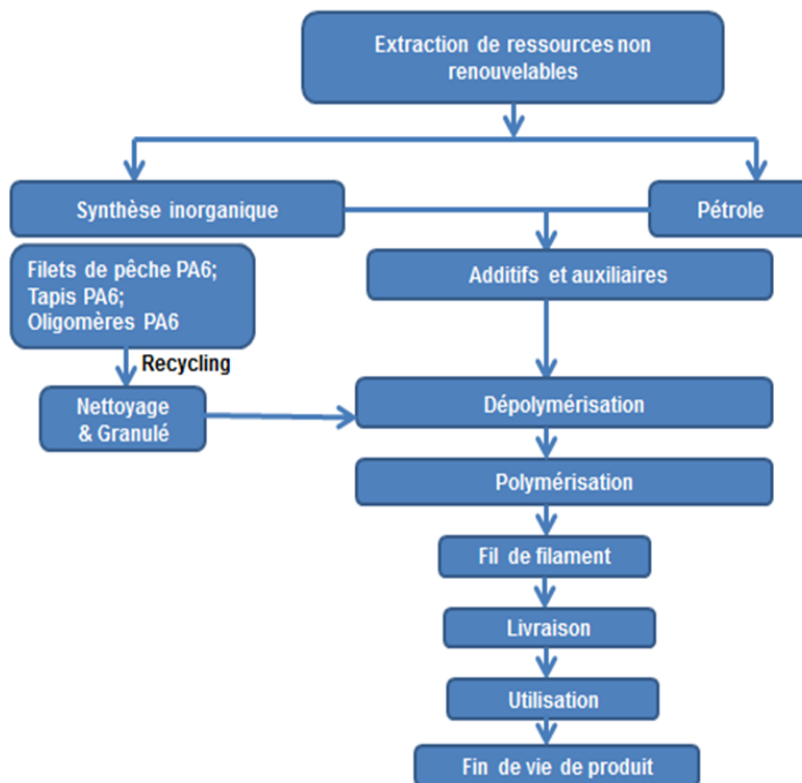


Figure 4-15 Cadre de l'analyse du cycle de vie du PA6 [Aquafil, 2014]

Le tableau 4-7 récapitule l'impact environnemental de la production de 1 kg de PA6.

Matériau (extraction)		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
PA6	Litt.	121	9.1	[Aquafil, 2014]
		139-145		[R.J. Tapper et al., 2020]
		129-158	6-8	CES Grantadesign
PA6 recyclé	Litt.	28-31	3.3-3.4	[Aquafil, 2014]

Tableau 4-7 Impact environnemental pour produire 1 kg de PA6 recyclé et 1kg de PA6 vierge

Polyamide 66 (PA66)

Le polyamide 66 (PA66) est un polyamide (marque Nylon) avec une très bonne résistance. Solvay Group a développé une technique «Move 4earth®» qui permet d'obtenir un polyamide 66 recyclé de haute qualité à partir de débris de tissu airbag [Solvay, 2016]. Solvay Groupe a analysé l'impact environnemental du PA66 en comparant le processus du PA66 recyclé (Technyl® 4earth® A4E 218 V35 Black) avec le processus du PA66 vierge (Technyl® A218 V30 Black 21NS) par la méthode d'analyse du cycle de vie. L'étude a été réalisée conformément aux normes ISO 14044. La limite du système pour l'évaluation du cycle de vie du PA66 est présentée sur la figure 4-16 [Solvay, 2016].

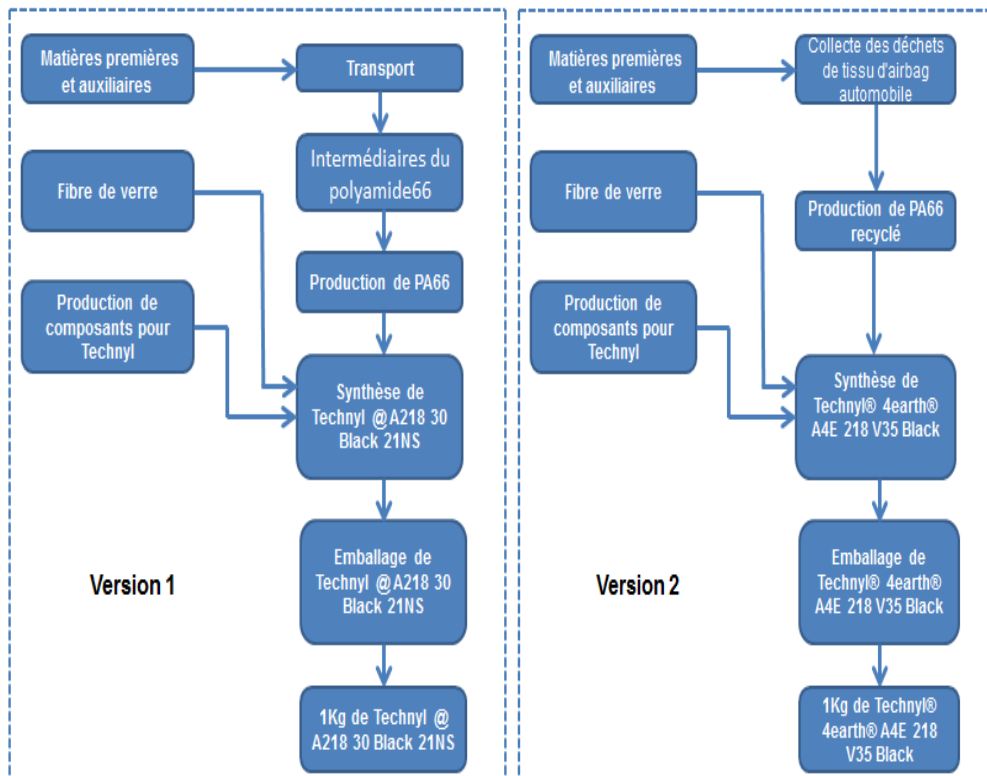


Figure 4-16 Limite du système pour l'analyse du cycle de vie du PA66 [Solvay, 2016]

Le grade du PA 66 vierge (Technyl® A218 V30 Black 21NS) est un PA66 qui a été renforcé par 30% de fibre de verre et le grade du PA 66 recyclé (Technyl® 4earth® A4E 218 V35 Black) est un PA66 recyclé qui a été renforcé par 35% de fibre de verre [Solvay, 2016]. Les résultats de l'ACV du PA66 sont résumés dans le tableau 4-8.

Matériau (extraction)		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
PA66	Litt.	97	4.4	[Solvay, 2016]
PA66 recyclé	Litt.	44	3	[Solvay, 2016]

Tableau 4-8 Impact environnemental pour produire 1 kg de PA66 vierge et 1kg de PA66 recyclé

Polyamide 11 (PA11)

Le polyamide 11 (PA11) est un bioplastique léger avec les hautes performances. ARKEMA Groupe a utilisé les graines de ricin pour la production du PA11 Rilsan® brand et la limite du système pour l'analyse du cycle de vie du polyamide 11 est présentée sur la figure 4-17 [J.F. Devaux et al., 2011]. L'ACV a été réalisée sur la base des ISO (ISO14040 ; ISO14043).

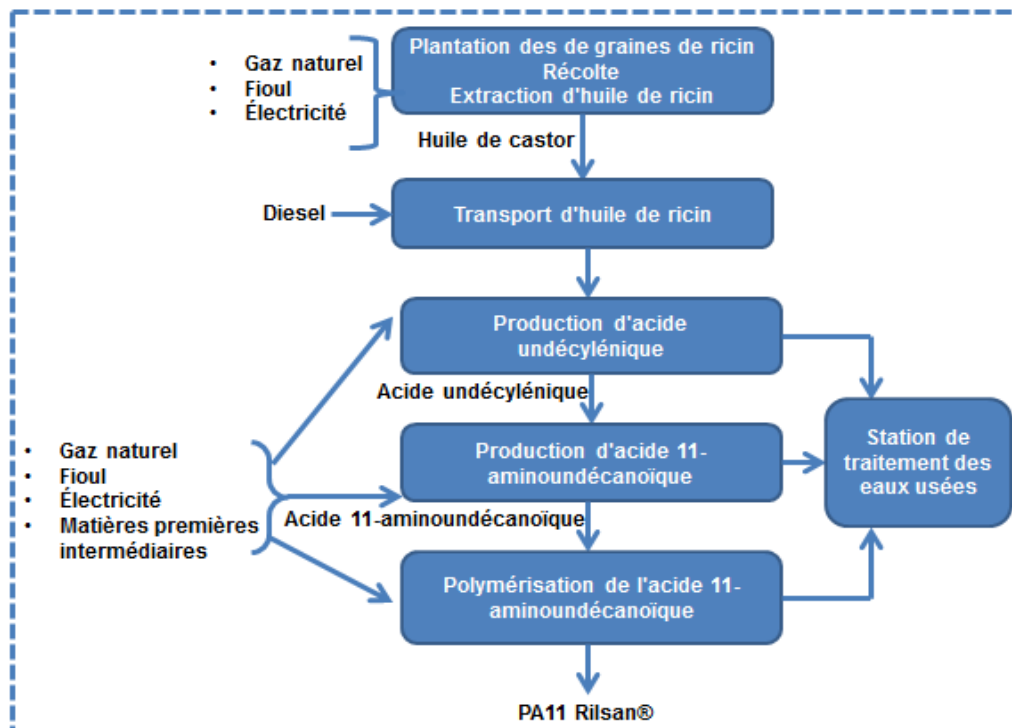


Figure 4-17 La limite du système pour l'analyse du cycle de vie du polyamide 11 [J.F. Devaux et al., 2011]

Il apparaît que les principales énergies utilisées pour produire du PA11 sont le gaz naturel, le fioul, l'électricité, les matières premières intermédiaires (catalyseur, caustique, ammoniac, etc.). Il convient aussi de considérer l'émission de gaz à effet de serre pendant la production du PA11. Les résultats de l'ACV de la production de 1 kg de PA11 et de 1 kg de PA12 sont résumés dans le tableau 4-9 [J.F. Devaux et al., 2011].

Matériau (extraction)		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
PA11 poudre	Litt.	162	4.2	[J.F. Devaux et al., 2011]
PA12 poudre	Litt.	207	6.9	[J.F. Devaux et al., 2011]

Tableau 4-9 Impact environnemental pour produire 1 kg de PA11 et 1kg de PA12

4.5 Acide polylactique (PLA)

Le PLA est un bio polymère. Il peut être obtenu à partir d'amidon de maïs. Le bio polymère PLA est un type de polymère de la famille des acides polylactiques, il a été polymérisé par le monomère L-lactide. L'ACV du PLA a été réalisée à partir de la méthode de la production d'une usine canne en Thaïlande [W.J. Groot et al., 2010] sur la base des ISO (ISO14040 2006a ; ISO14043 2006b). La limite du système pour l'ACV du PLA est présentée sur la figure 4-18 [W.J. Groot et al., 2010].

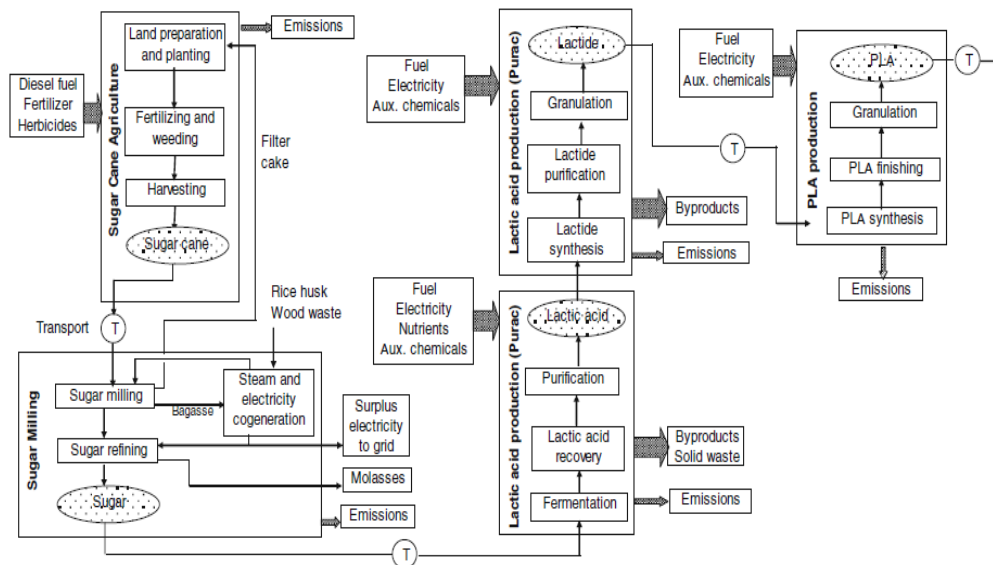


Figure 4-18 Limite du système pour l'analyse du cycle de vie du PLA [W.J Groot et al., 2010]

Il apparaît que les principales énergies utilisées pour produire du PLA en Thaïlande sont le fioul et l'électricité. Les résultats de l'ACV pour produire 1 kg de PLA sont résumés dans le tableau 4-10 [W.J. Groot et al., 2010].

Matériau (extraction)		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
PLA	Litt.	78	0.5	[W.J. Groot et al., 2010]

Tableau 4-10 Impact environnemental pour produire 1 kg de PLA vierge [W.J. Groot et al., 2010]

4.6 Comparaison des impacts environnementaux des différentes résines thermoplastiques

Le graphique montre que la consommation de l'énergie pour la production de 1kg de résine (figure 4-19).

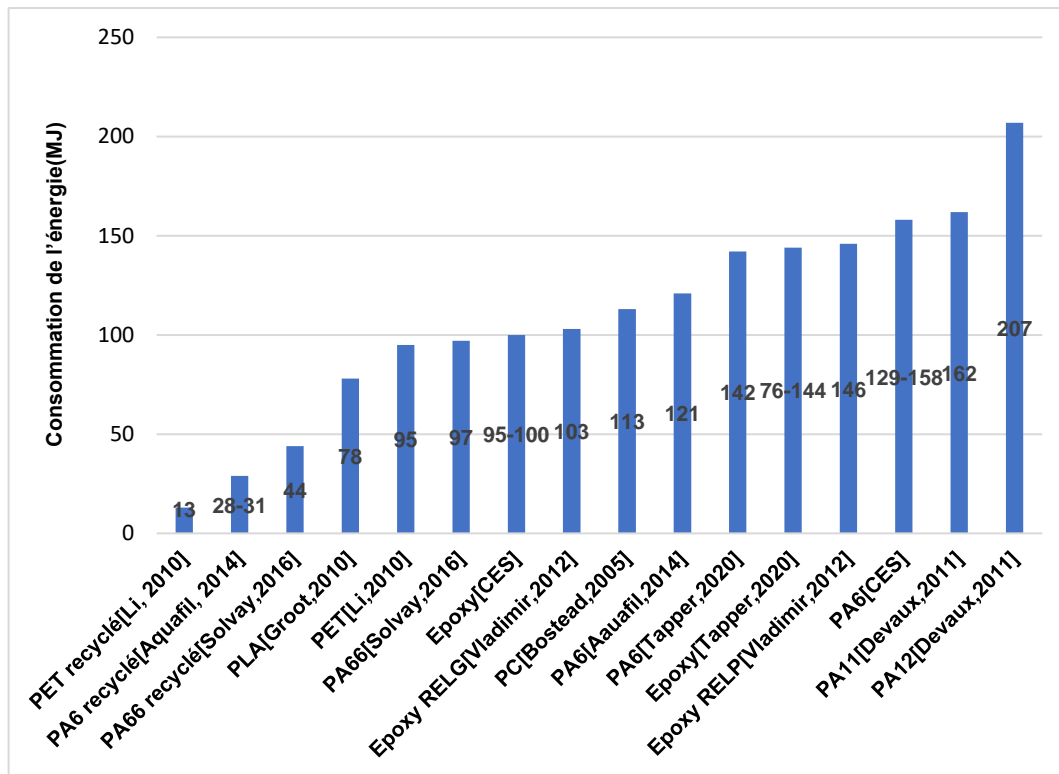


Figure 4-19 Consommation d'énergie pour la production de 1 kg de résine

- Époxy RELG : produite par le glycérol
- Époxy RELP : produite par le propylène

Les matériaux qui ont la plus faible consommation d'énergie sont des matériaux recyclés et les matériaux bio-sourcés.

La figure 4-20 montre l'équivalent CO₂ pour la production de 1 kg des résines sélectionnées.

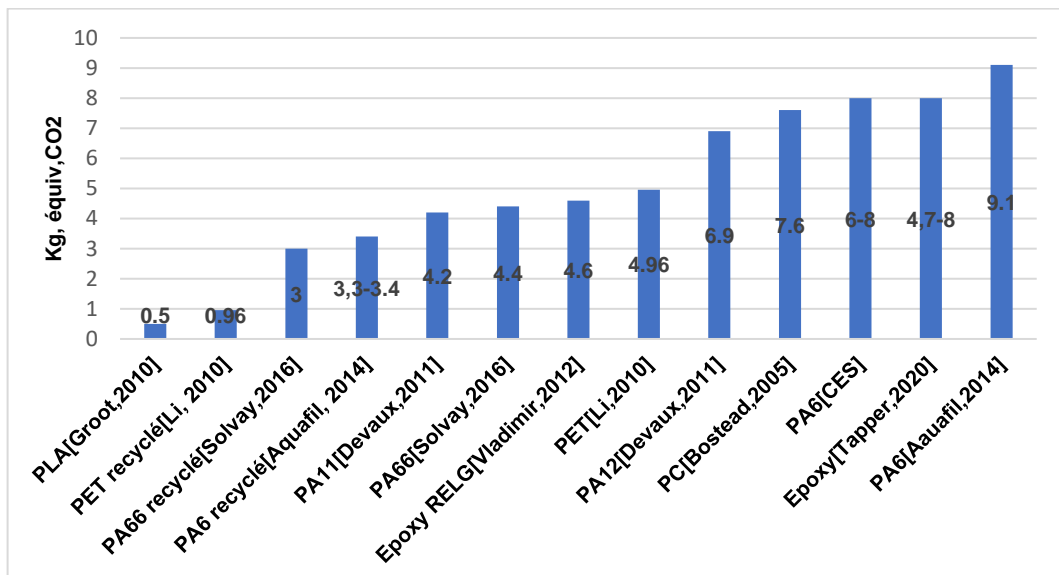


Figure 4-20 Potentiel de réchauffement climatique (kg, équiv.CO₂) pour la production de 1 kg de résine

Il apparaît que dans la grande majorité des cas, l'équivalent CO₂ est plus fort que celui de l'époxy. Les matériaux qui ont le plus faible équivalent CO₂ sont des matériaux recyclés et les matériaux Bio-sourcés. La micronisation augmente l'impact environnemental des matériaux sous forme de poudres.

4.7 Fibres de verre

La fibre de verre à filament continu a été fabriquée et commercialisée depuis plus de 60 ans [GlassFibreEurope, 2016]. Depuis, elle est devenue l'un des matériaux artificiels les plus utiles au monde pour la fabrication de matériaux composites. L'ACV a été réalisée sur la base des ISO (ISO14040 ; ISO14044) et la limite du système pour l'analyse du cycle de vie de la fibre de verre à filament continu est présentée sur la figure 4-21 [GlassFibreEurope, 2016].

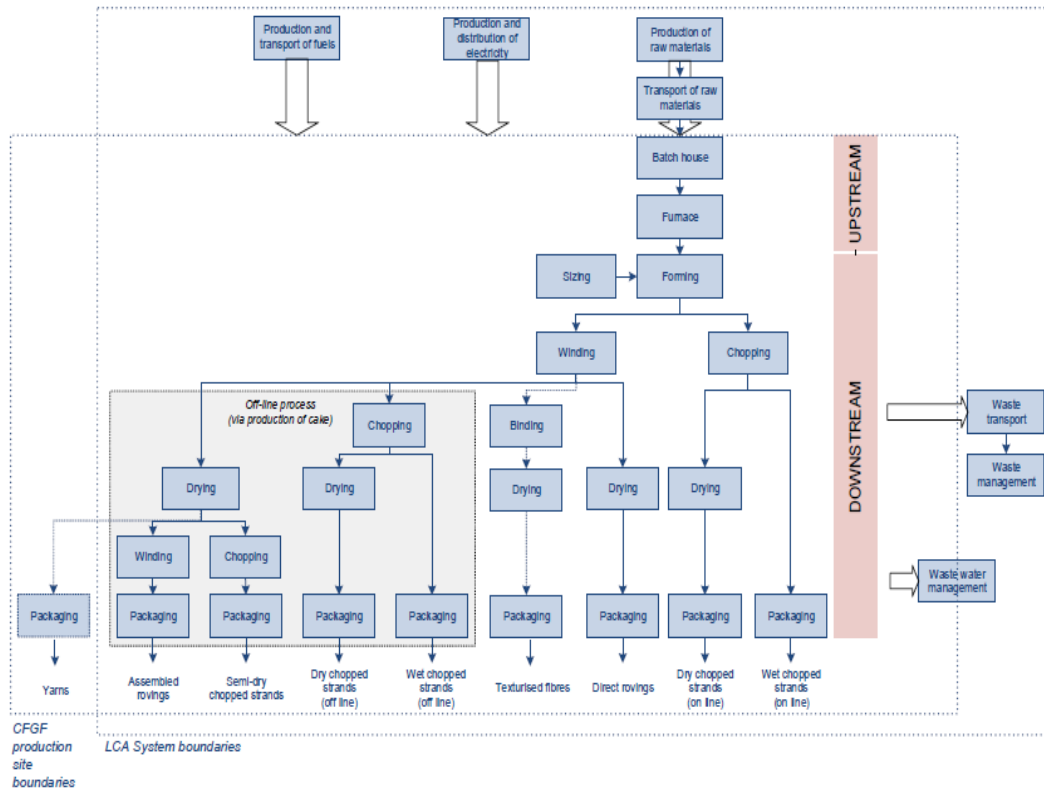


Figure 4-21 La limite du système pour l'ACV de la fibre de verre à filament continu [GlassFibreEurope, 2016]

Cette étude de l'ACV inclut les 5 produits en fibre de verre suivants (figure 4-22) [GlassFibreEurope, 2016] :

- Brins coupés à sec
- Brins coupés humides (7 à 14% d'humidité)
- Mèches directes (produits secs)
- Mèches assemblées (produits secs)
- Tapis (tapis à fils coupés, tapis à filaments continus)

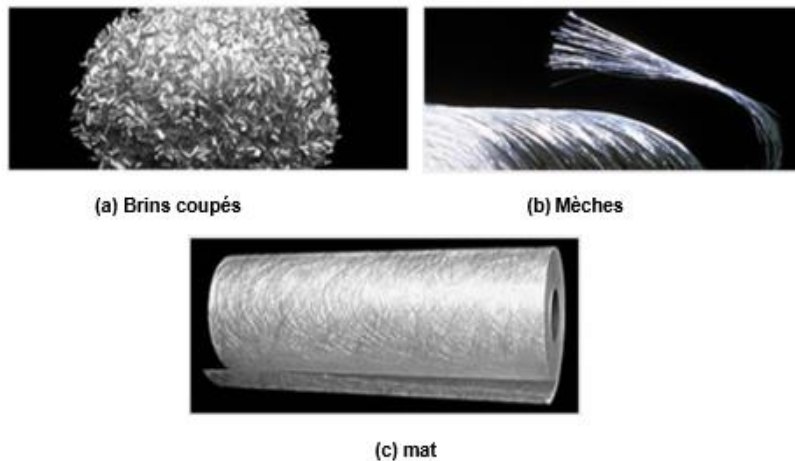


Figure 4-22 Produits en fibre de verre à filament continu [GlassFibreEurope, 2016]

Les résultats d'analyses environnementales pour produire 1 kg de fibre de verre sont résumés dans le tableau 4-11.

Matériau (extraction)		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
Fibres de verre	Litt	13 – 54	1.78	[F. Meng et al., 2020]
		40.5 (tissée)		[GlassFibreEurope, 2016]
		25-28		CES Grantadesign

Tableau 4-11 Impact environnemental pour produire 1 kg de fibre de verre

4.8 Fibres de carbone

La fibre de carbone est une fibre haute résistance ou haut module. Sur le rapport d'EUCIA (European Composites Industry Association) pour la fabrication des fibres de carbone, le PAN (polyacrylonitrile) est utilisé comme base à 95% avec 5% d'acétate de vinyle (AV) ou d'acrylate de méthyle (AM) (figure 4-23). Ce type du PAN est utilisé pour fabriquer la fibre de carbone (figure 4-24).

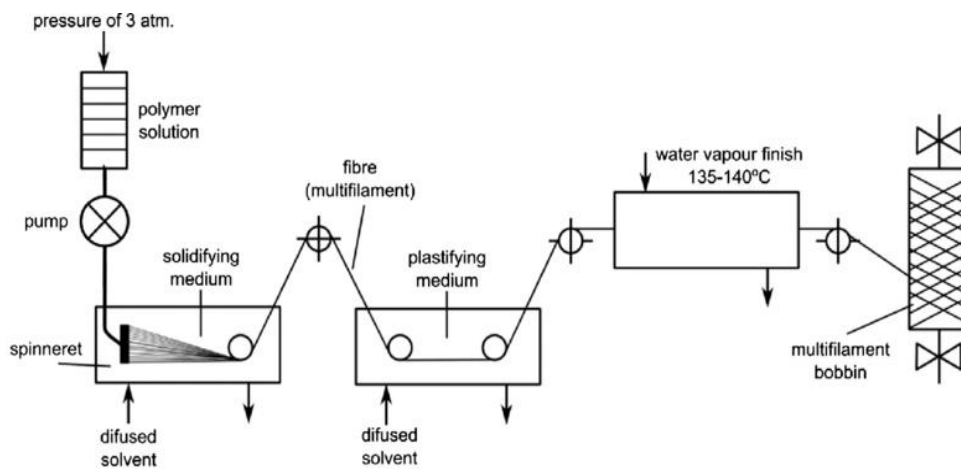


Figure 4-23 Processus de fabrication de fibres de PAN [I. Karbownik et al., 2015]

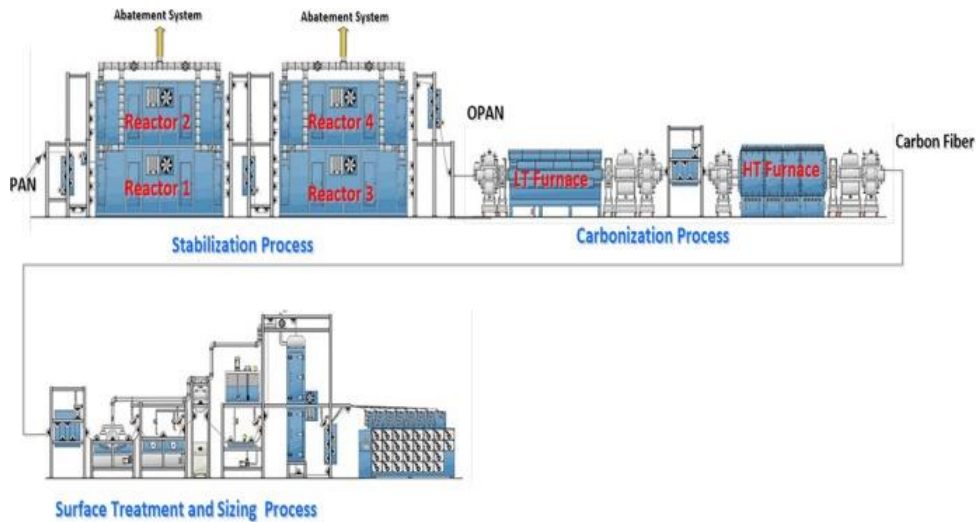


Figure 4-24 Processus de fabrication de fibres de carbone à base de PAN [H. Khayyam et al., 2020]

Les résultats d'analyses environnementales pour produire 1 kg de fibre de carbone sont résumés dans le tableau 4-12.

Matériau (extraction)	MJ/kg	kg CO2/kg	Source
Fibres de carbone	Litt.	198 – 595	[F. Meng et al., 2020]
		461	[T. Ghosh et al., 2021]
		286	[T. Suzuki et al., 2005]
		272-300 (HR)	CES Grantadesign
		632-840	[M.C. Johnson et al., 2014]
		171-771	[R.J. Tapper et al., 2020]

Tableau 4-12 Impact environnemental de la production de 1 kg de la fibre de carbone

4.9 Impact environnemental de la mise en œuvre d'un matériau composite

Il existe une variété de processus de fabrication pour la mise en œuvre d'un matériau composite. L'impact environnemental de chaque procédé pour la mise en œuvre du composite est reporté dans le tableau 4-13.

Procédé	MJ/kg	kg CO2/kg	Source
Moulage par compression	23,4	1,7	[T. Ghosh et al., 2021]
Preform match die	9-10.1		CES Granta design
Autoclave	21,9		[R.J. Tapper et al., 2020]
RTM	11,6-12,8		[R.J. Tapper et al., 2020]
Compression molding	7,2-15,9		[R.J. Tapper et al., 2020]

Tableau 4-13 Impact environnemental pour la mise en œuvre de 1 kg d'un matériau composite en fonction du procédé choisi

4.10 Impact environnemental pour la mise en œuvre d'un thermoplastique par thermoformage

Les valeurs de l'impact environnement et l'énergétique pour la mise en œuvre d'un thermoplastique par thermoformage avec les différents procédés sont résumées dans le tableau 4-14.

Procédé	MJ/kg	kg CO2/kg	Source
Injection	33.7	11.2	[C.Hill et al., 2019]
Injection moulding	19-29,9		[R.J. Tapper et al., 2020]
Injection PA	21-23		CES Granta Design
Stamping 50% fib	19-23		CES Granta Design

Tableau 4-14 Impact environnemental et énergétique pour la mise en œuvre avec les différents procédés

4.11 Impact environnemental des différents procédés de traitement de déchets composites et de recyclage de fibres de carbone

Les résultats de l'impact environnemental et énergétique pour le traitement de 1kg de déchets composites sont résumés dans le tableau 4-15.

Procédé	MJ/kg	kg CO2/kg	Source
Broyage	30	34	CES Grantadesign
Broyage	0,14-51		[R.J. Tapper et al., 2020]
Ennfouissement	0,11-0,4		[R.J. Tapper et al., 2020]
Incineration	32-34		[R.J. Tapper et al., 2020]
Realignement	1	5,4	Mesures I2M
Fluidized bed	14,4		[F. Meng et al., 2020]
Pyrolyse	59,4		[T. Ghosh et al., 2021]
Pyrolyse	30		[R.A. Witik et al., 2013]
Pyrolyse	15,5		[B.Pillain et al., 2013]
Solvolyse	4,1 – 41		[B.Pillain et al., 2019]
Solvolyse	15-64		[R.J. Tapper et al., 2020]
Pyrolyse	2,8-30		[R.J. Tapper et al., 2020]

Tableau 4-15 Impact environnemental et énergétique pour le traitement de 1kg de déchet composite

4.12 Récapitulatif des impacts environnementaux des matériaux et des procédés

Le tableau 4-16 est une synthèse des différents impacts environnementaux en termes de matériaux et de procédés. Nous précisons aussi dans ce tableau les valeurs qui vont servir de base à l'estimation des impacts environnementaux de la pale d'éolienne.

Matériau (extraction)		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
Alliage léger	Litt.	159 190-210 197-298 116-136 (avec 40% rAl)		[D. He et al., 2021] CES Grantadesign [R.J. Tapper et al., 2020] CES Grantadesign
	Val choisie	130 et 40% de recyclé		
Fibres de verre	Litt.	13 – 54 40.5 (tissée) 25-28	1.78	[F. Meng et al., 2020] [GlassFibreEurope, 2016] CES Grantadesign
	Val. choisie	30	1.78	
Fibres de carbone	Litt.	198 – 595 461 286 272-300 (HR) 632-840	30,1 29,5	[F. Meng et al., 2020] [T. Ghosh et al., 2021] [T. Suzuki et al., 2005] CES Grantadesign [M.C. Johnson et al., 2014]
	Val. choisie	300	30	
Résine Epoxy	Litt.	91-100 103 (RELG) 146 (RELP) 76-144	4.6 8.7 4,7-8	CES Grantadesign [K. Vladimír et al.,2012] [K. Vladimír et al.,2012] [R.J. Tapper et al., 2020]
	Val. choisie	100	6	
PET	Litt.	95	4.06	[S. Li et al., 2010]
	Val. choisie			
PET recyclé	Litt.	13	0.96	[S. Li et al., 2010]
	Val. choisie	13	0.96	
PC	Litt.	113	7.6	[I. Boustead, 2005]
	Val. choisie	113	7.6	
PA6	Litt.	121 139-145 129-158	9.1 6-8	[Aquafil, 2014] [R.J. Tapper et al., 2020] CES Grantadesign
	Val. choisie	130	7	

PA6 recyclé	Litt.	28-31	3.3-3.4	[Aquafil, 2014]
	Val. choisie	30	3,4	
PA66	Litt.	97	4.4	[Solvay, 2016]
	Val. choisie			
PA66 recyclé	Litt.	44	3	[Solvay, 2016]
	Val. choisie			
PC recyclé	Litt.			
	Val. choisie	26	3,8	
PA11 poudre	Litt.	162	4.2	[J.F. Devaux et al., 2011]
	Val. choisie			
PA12 poudre	Litt.	207	6.9	[J.F. Devaux et al., 2011]
	Val. choisie			
PLA	Litt.	78	0.5	[W.J. Groot et al., 2010]
	Val. choisie	78		
Procédé		MJ/kg	kg CO2/kg	Source
Traitement de déchets	Litt.	30 (broyage)		CES Grantadesign
		0,14-51 (broyage)	34	[R.J. Tapper et al., 2020]
		0,11-0,4 (enfouissement)		[R.J. Tapper et al., 2020]
		32-34 (incineration)	2,17-3,05	[R.J. Tapper et al., 2020]
	Val. choisie	30 (broyage) 0,4 (compact.+enfouis.)		
Mise en œuvre de thermoplastiques	Litt.	33.7 (Injection)	11.2	[C.Hill et al., 2019]
		21-23 (injection PA)		CES Granta Design
		19-23 (stamping 50% fib)		CES Granta Design
	Val. choisie	20 (stamping 50% fib) 15 (extrusion)		
Recyclage de fibres de carbone		1 (realignment)		Mesures I2M
		14,4 (fluidized bed)	5,4	[F. Meng et al., 2020]
	Litt.	59,4 (pyrolyse)		[T. Ghosh et al., 2021]
		30 (pyrolyse)		[R.A. Witik et al., 2013]

		15,5 (pyrolyse) 4,1 – 41 (solvolyse) 15-64 (solvolyse) 2,8-30 (pyrolyse)		[B.Pillain et al., 2013] [B.Pillain et al., 2019] [R.J. Tapper et al., 2020] [R.J. Tapper et al., 2020]
	Val.choisie	30 (vapo-thermolyse) 1 (realignement)		
Mise en œuvre de composites	Litt.	23,4 (moulage comp) 9-10.1 (pref. match die) 21,9 (autoclave) 11,6-12,8 (RTM) 7,2-15,9 (comp.molding)	1,7	[T. Ghosh et al., 2021] CES Granta design [R.J. Tapper et al., 2020] [R.J. Tapper et al., 2020] [R.J. Tapper et al., 2020]
	Val.choisie	10 (compression mold.)		
Mise en œuvre d'alliage léger	Litt.	13,1 (moul. Pression) 10-12 (moulage) 3 - 3.5 (Emboutissage)		[D. He et al., 2021] CES Granta design CES Granta design
	Val.choisie	3.5 (Emboutissage)		

Tableau 4-16 Récapitulatif des impacts environnementaux des matériaux et des procédés – « Val.choie » représente la valeur qui va servir de base à l'évaluation de l'impact environnemental pour une pale d'éolienne

5. Evaluation des impacts environnementaux d'une pale d'éolienne en fonction du matériau choisi

5.1 Rappel de l'unité fonctionnelle et des hypothèses

Il s'agit de calculer l'impact environnemental d'une pale d'éolienne portable 500W (qui compte 5 pales) en fonction du matériau utilisé. L'unité fonctionnelle sera alors une pale d'éolienne délivrant 500W pour un vent de 12m/s et résistant à des vents de 45m/s, utilisable entre -30°C et +45°C, également en milieu marin, avec une durée de vie de 5 ans en plein soleil.

Il sera considéré des processus industriels stabilisés pour une production en série dans des usines déjà existantes et fabriquant plusieurs autres produits. Ainsi le calcul de l'impact environnemental sera basé sur une approche énergétique qui néglige l'impact de la fabrication des machines et de l'implantation des usines.

Les hypothèses complémentaires sont les suivantes :

- La vapo thermolyse consomme 20L d'eau par kg de fibre de carbone recyclée produite (scénarios 3 et 4) ;
- L'enfouissement de déchets composites demande un broyage grossier (compactage) ; la quantité d'énergie associée est de 0,4 MJ par kg de déchet composite enfoui.

Nous allons comparer l'impact énergétique (paragraphe 5.2 du chapitre 4) et l'impact environnemental réalisé par ACV multicritère (paragraphe 5.3 du chapitre 4) de l'utilisation des différents matériaux pour réaliser une pale d'éolienne.

5.2 Bilan énergétique

La quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de chaque pale d'éolienne est calculée dans les tableaux 4-17 à 4-26. Les impacts énergétiques ont été calculés suivant les scénarios décrits en paragraphe 3.2.1 du chapitre 4 à paragraphe 3.2.4 du chapitre 4.

Pale alliage léger	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Alliage léger contenant 40% de recyclé	1 279	130	166 270
Emboutissage	1 279	3,5	4 477
Peinture (Résine époxy)	5	100	500
Peinture par projection	964	29	27 956
Compactage et enfouissement	643	0,4	257
TOTAL PALE ALLIAGE LEGER			199 460

Tableau 4-17 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale alliage léger

Pale FV – Epoxy	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Fibres de verre	963	30	28 890
Résine époxy	321	100	32 100
Moulage composite par compression	1 284	10	12 840
Compactage et enfouissement	1 284	0,4	514
TOTAL PALE FV/EPOXY			74 344

Tableau 4-18 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FV-Epoxy

Pale FCR – Epoxy	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Vapo thermolyse	366	30	10 980
Collecte	437		
Réalignement	486	1	486
Résine époxy	242	100	24 200
Moulage composite par compression	486	10	4 860
Compactage et enfouissement	680	0,4	272
TOTAL PALE FCR/EPOXY			40 798

Tableau 4-19 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FCR-Epoxy

Pale FCR – PA	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
----------------------	--------------	-------	----------------------------

Vapo thermolyse	305	30	9 150
Collecte	437		
Réalignement	405	1	405
Résine PA	210	120	25 200
Moulage TP par compression	615	20	12 300
Recyclage TP chargé	148	30	4 440
Compactage et enfouissement	467	0,4	187
TOTAL PALE FCr/PA			51 682

Tableau 4-20 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FCR-PA

Pale FCR – PC	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Vapo thermolyse	305	30	9 150
Collecte	437		
Réalignement	405	1	405
Résine PC	210	113	23 730
Moulage TP par compression	615	20	12 300
Recyclage TP chargé	148	30	4 440
Compactage et enfouissement	467	0,4	187
TOTAL PALE FCr/PC			50 212

Tableau 4-21 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FCR-PC

Pale FCR – PLA	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Vapo thermolyse	305	30	9 150
Collecte	437		
Réalignement	405	1	405
Résine PLA	210	78	16 380
Moulage TP par compression	615	20	12 300
Recyclage TP chargé	148	30	4 440
Compactage et enfouissement	467	0,4	187
TOTAL PALE FCr/PLA			42 862

Tableau 4-22 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FCR-PLA

Pale FCR – PET	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Vapo thermolyse	305	30	9 150
Collecte	437		

Réalignement	405	1	405
Résine PET	210	95	19 950
Moulage TP par compression	615	20	12 300
Recyclage TP chargé	148	30	4 440
Compactage et enfouissement	467	0,4	187
TOTAL PALE FCr/PET			46 432

Tableau 4-23 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FCR-PET

Pale FCR – PArecyclé	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Vapo thermolyse	305	30	9 150
Collecte	437		
Réalignement	405	1	405
Résine PA recyclée	210	30	6 300
Moulage TP par compression	615	20	12 300
Recyclage TP chargé	148	30	4 440
Compactage et enfouissement	467	0,4	187
TOTAL PALE FCr/PArecyclé			32 782

Tableau 4-24 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FCR-PArecyclé

Pale FCR – PCrecyclé	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Vapo thermolyse	305	30	9 150
Collecte	437		
Réalignement	405	1	405
Résine PC recyclée	210	26	6 300
Moulage TP par compression	615	20	12 300
Recyclage TP chargé	148	30	4 440
Compactage et enfouissement	467	0,4	187
TOTAL PALE FCr/PCrecyclé			31 942

Tableau 4-25 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FCR-PCrecyclé

Pale FCR – PETrecyclé	Masse (g)	MJ/kg	Energie nécessaire (kJ)
Vapo thermolyse	305	30	9 150
Collecte	437		

Réalignement	405	1	405
Résine PET recyclée	210	13	2 730
Moulage TP par compression	615	20	12 300
Recyclage TP chargé	148	30	4 440
Compactage et enfouissement	467	0,4	187
TOTAL PALE FCr/PETrecyclé			29 212

Tableau 4-26 Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication de pale FCr-PETrecyclé

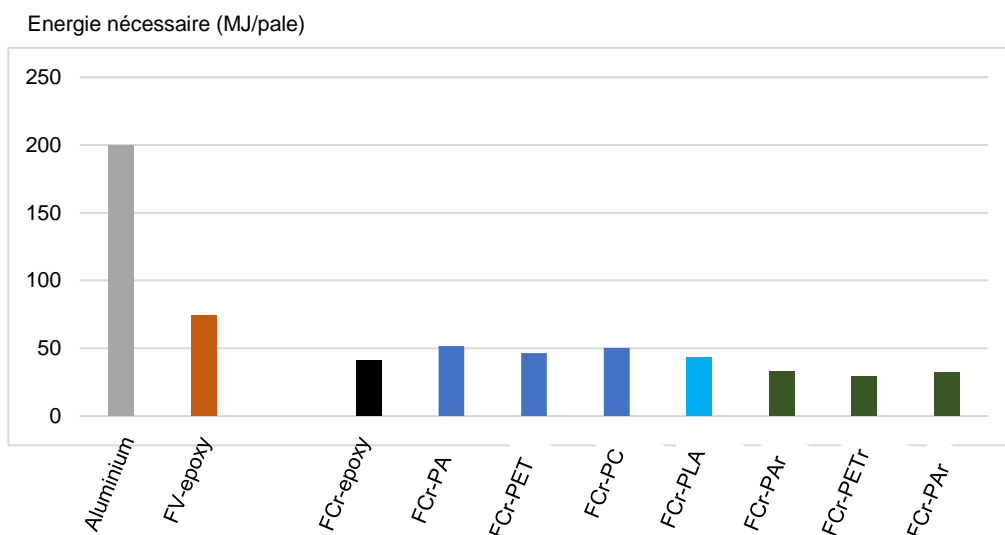


Figure 4-25 Energie grise nécessaire à la vie d'une pale d'éolienne portable 500W en fonction du matériau

L'analyse de la figure 4-25 montre une forte diminution de l'impact environnemental énergétique d'une pale d'éolienne portable par l'utilisation de composite à fibres de carbone recyclées réalignées ; en effet le composite FCr fait chuter l'impact environnemental de 80% par rapport à l'alliage léger et de 45% par rapport au composite à fibres de verre.

L'utilisation de matrice thermoplastique vierge avec les FCr demande une énergie assez comparable à l'utilisation de résine époxy (légèrement supérieure). Il est à noter que l'utilisation d'une résine agro-sourcée, même bien optimisée comme le PLA, ne permet pas de diminuer l'impact énergétique de la pale d'éolienne.

En revanche, il est intéressant de constater que l'utilisation d'une résine thermoplastique recyclée avec les fibres de carbone recyclées est très favorable à l'impact énergétique par rapport à la résine époxy ou thermoplastique vierge. Le meilleur impact environnemental est obtenu avec la résine PET qui possède en effet une filière de recyclage très organisée et donc sobre. Malheureusement les performances mécaniques de ce matériau ne sont pas suffisantes (voir chapitre 3). Les résines PA recyclées et PC recyclées qui présentent les meilleures caractéristiques mécaniques avec les FCr permettent de faire diminuer l'impact de 20% à 25% par rapport à la résine époxy. D'un point de vue énergétique, le PA recyclé et le PC recyclé sont donc des matrices à privilégier.

5.3 Modélisation des impacts environnementaux d'une pale d'éolienne

L'impact énergétique est un moyen simple (monocritère) pour comparer l'impact de l'utilisation de différents matériaux sur un produit (ici la pale d'éolienne portative). Toutefois une réelle ACV fournira des éléments plus complets (multicritères) sur l'impact environnemental réel du produit. La modélisation a été réalisée avec le logiciel SIMAPRO®. Les modélisations se basent sur les scénarios représentés au paragraphe 3.2 du chapitre 4. La méthode de calcul d'impact ReCiPe Midpoint (H) a été utilisée avec la base de données Ecolinvent.

Afin de faciliter l'interprétation, seuls les 6 critères les plus pertinents (selon les recommandations de l'ADEME) ont été retenus pour comparer les impacts environnementaux :

- ✓ Potentiel de réchauffement climatique : CO₂ émis
- ✓ Appauvrissement en ozone stratosphérique
- ✓ Eutrophisation de l'eau douce
- ✓ Toxicité humaine : effets cancérigènes
- ✓ Raréfaction des ressources minérales
- ✓ Raréfaction des ressources fossiles

Certains impacts sont très peu affectés par le changement de matériau et certains impacts souffrent d'une trop grande incertitude ou demanderaient trop d'hypothèses incertaines. Ainsi il a été choisi de ne pas considérer les impacts suivants :

- Rayonnement ionisant
- Formation de l'ozone, santé humaine
- Formation de particules fines
- Formation de l'ozone, écosystèmes terrestres
- Acidification terrestre
- Écotoxicité terrestre
- Écotoxicité marine
- Toxicité humaine non cancérigène
- Utilisation des sols
- Consommation d'eau

Les impacts des scénarios représentant les différents matériaux sont représentés pour chaque critère sur les figures 4-26 à 4-31 et le récapitulatif sur la figure 4-32.

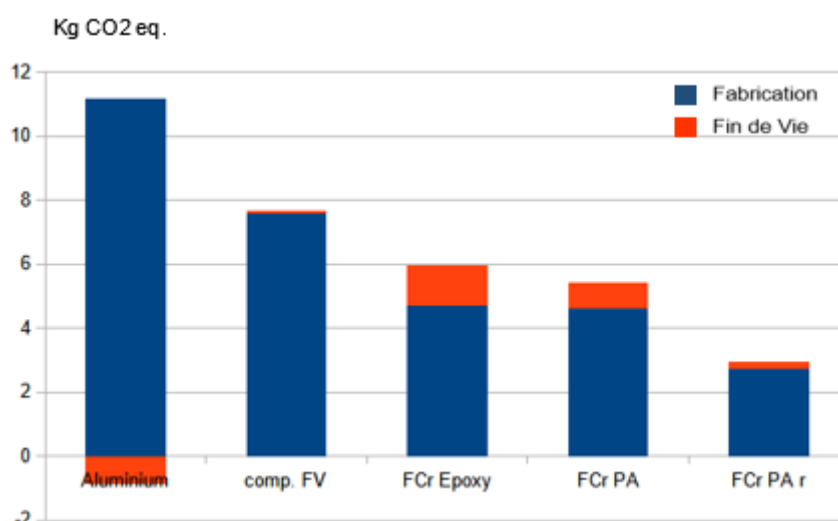


Figure 4-26 Impact sur le réchauffement climatique d'une pale d'éolienne portative 500W en fonction du matériau choisi

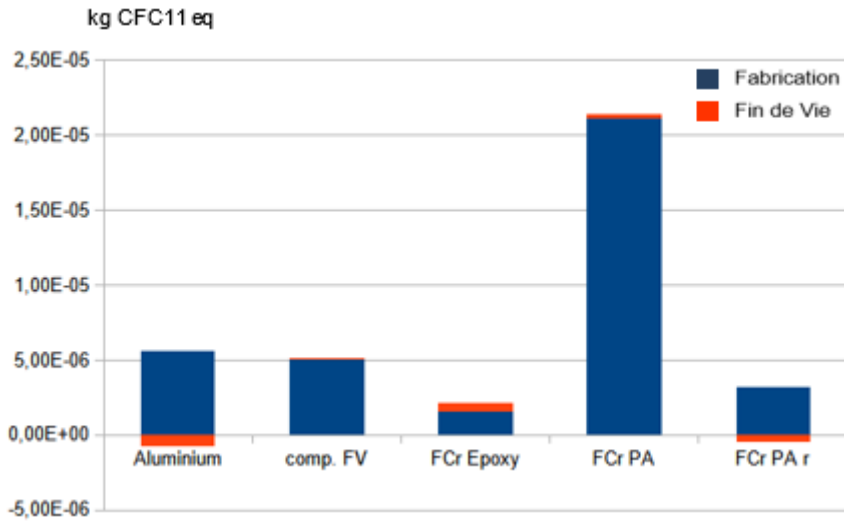


Figure 4-27 Impact sur la déplétion d'ozone stratosphérique d'une pale d'éolienne portable 500W en fonction du matériau choisi

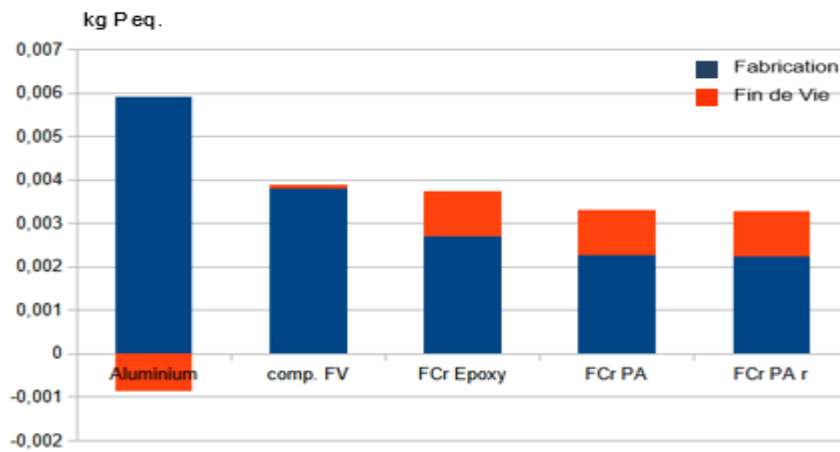


Figure 4-28 Impact sur l'eutrophisation de l'eau douce d'une pale d'éolienne portable 500W en fonction du matériau choisi

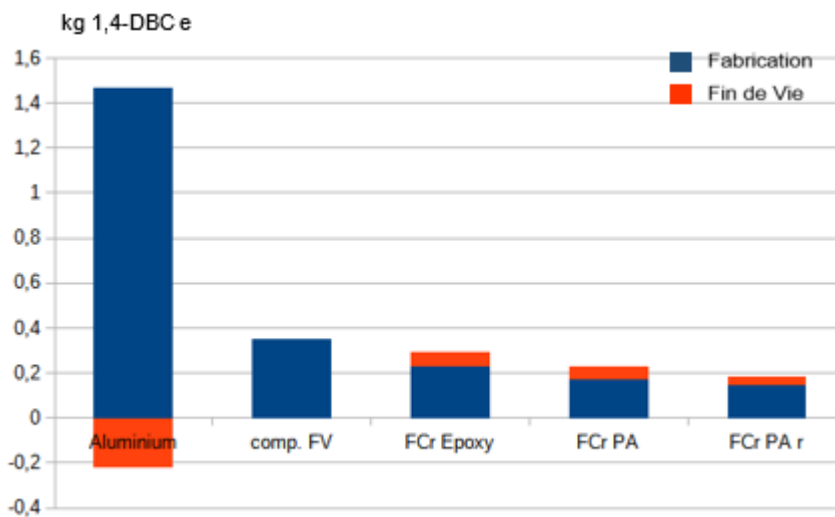


Figure 4-29 Toxicité cancérogène pour l'homme d'une pale d'éolienne portable 500W en fonction du matériau choisi

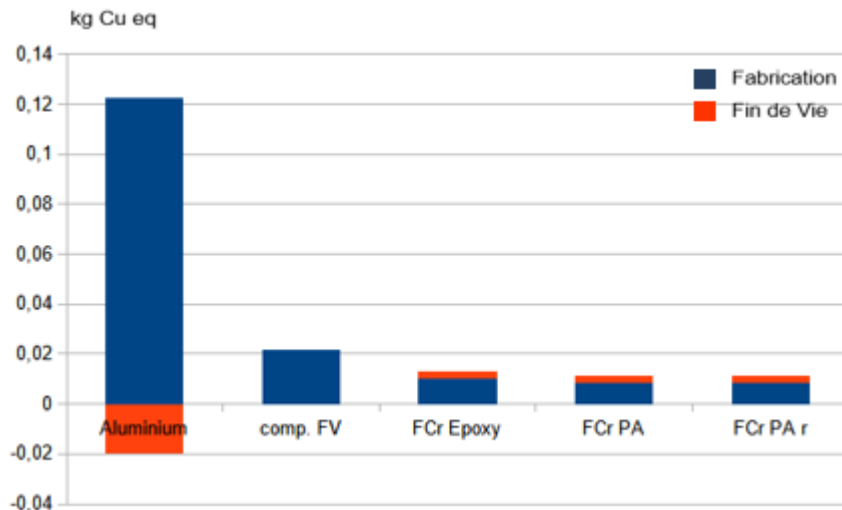


Figure 4-30 Contribution à la rareté des ressources minérales d'une pale d'éolienne portable 500W en fonction du matériau choisi

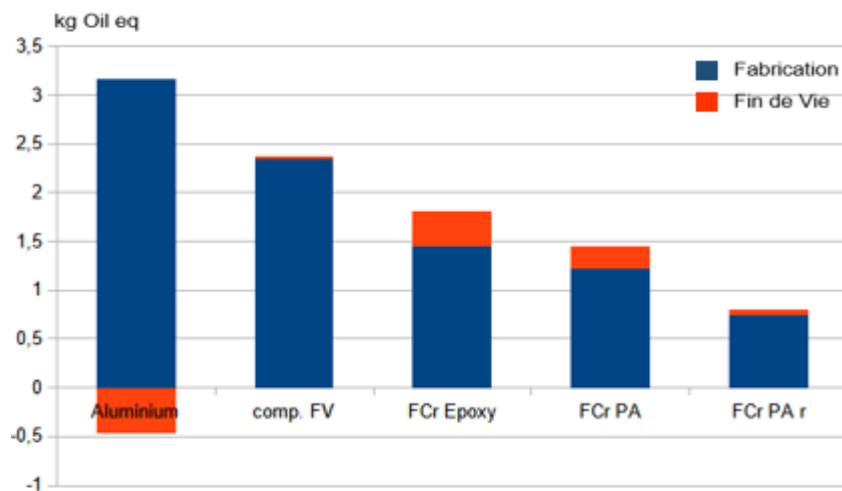


Figure 4-31 Contribution à la rareté des ressources Fossiles d'une pale d'éolienne portable 500W en fonction du matériau choisi

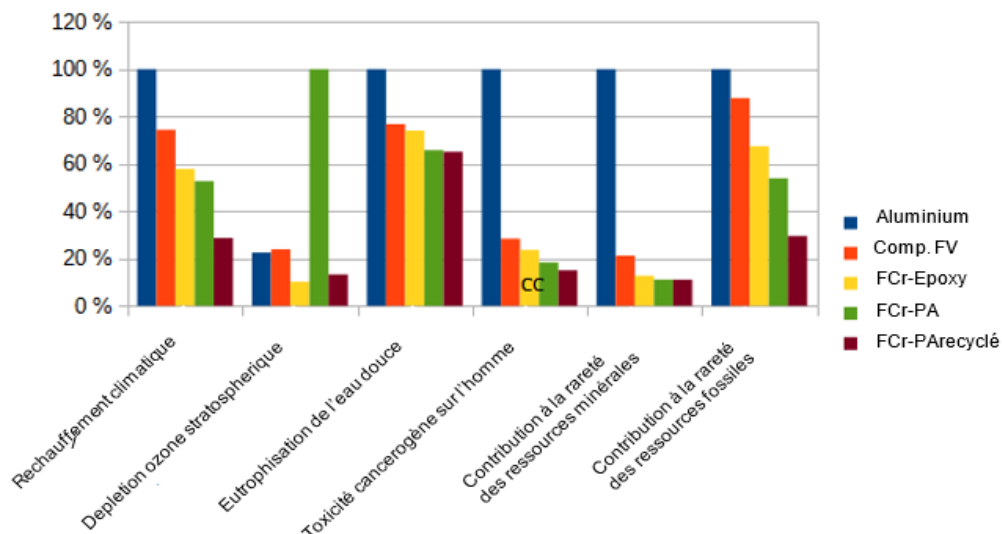


Figure 4-32 Comparaison des principaux impacts environnementaux d'une pale d'éolienne portable 500W en fonction du matériau choisi

D'une manière générale, l'ACV comparative réalisée ici confirme le fort intérêt environnemental, sur l'ensemble des 6 critères retenus, d'utiliser un composite à fibres de carbone recyclées par rapport aux matériaux classiques comme l'alliage d'aluminium ou le composite à fibres de verre.

L'analyse des figures précédentes montre que l'utilisation d'une matrice thermoplastique (PA vierge) avec les fibres de carbone recyclées permet un léger bénéfice environnemental par rapport à la résine époxy sur 4 critères (Potentiel de réchauffement climatique, eutrophisation de l'eau douce, toxicité humaine cancérigène, raréfaction des ressources fossiles) ; l'utilisation de thermoplastique est équivalente à la résine époxy pour le critère de raréfaction des ressources minérales. Il apparaît (de façon inexplicite) un très fort impact de l'utilisation de PA vierge sur l'appauvrissement en ozone stratosphérique. Peut-être s'agit-il de la surestimation de l'impact de la synthèse du polyamide dans la modélisation.

L'utilisation d'une matrice PA recyclée avec les fibres de carbone recyclées permet encore de diminuer l'impact environnemental de la pale d'éolienne sur 3 critères : potentiel de réchauffement climatique, toxicité humaine cancérigène et raréfaction des ressources fossiles.

Conclusions et perspectives

Les architectures de fibres recyclées semi-longues avec un très bon alignement ont été produites par la technologie de réalignement brevetée du laboratoire I2M Bordeaux qui permet d'assurer une exploitation optimale des propriétés des fibres de carbone recyclées.

Dans le but de maîtriser et d'optimiser les propriétés d'un composite à base de fibres de carbone recyclées qui sont des fibres discontinues, les mécanismes de transfert de charge entre fibres ont été étudiés, et les propriétés utiles de la matrice ont été identifiées. Une attention particulière a été portée au calcul de la longueur de transfert de charge entre deux fibres discontinues en fonction des propriétés de l'interface fibre recyclée / matrice thermoplastique. En effet, notre objectif était non seulement de rechercher des solutions optimales en termes de résistance mais aussi des solutions qui permettent de limiter l'impact environnemental, d'où notre choix des matrices thermoplastiques (y compris recyclées) pour cette étude.

Des modèles numériques ont été développés pour simuler le transfert de charge entre deux fibres se recouvrant partiellement. Un premier modèle a permis de simuler un simple recouvrement. Ce modèle a été validé à partir de la solution analytique de Yuan [H. Yuan et al., 2004]. Dans la deuxième partie, le modèle a été modifié pour simuler le comportement d'un joint à double recouvrement. En effet, dans cette configuration, la symétrie permet de n'avoir qu'une sollicitation du joint en cisaillement pur. La comparaison entre la simulation numérique et les essais expérimentaux a permis d'identifier les caractéristiques mécaniques de l'interface époxy entre fibres de carbone (ensimées) : $G_{IIC}=1,56 \text{ KJ/m}^2$ et $\tau_f=27,6 \text{ MPa}$. Ensuite le modèle numérique a été utilisé pour analyser l'influence des paramètres sur la résistance du joint du double recouvrement (avec la longueur de recouvrement $L_r=75\text{mm}$). Les résultats démontrent que seul G_{IIC} a une influence sur la résistance du composite à fibres discontinues. En conséquence, la réalisation de matériaux composites à fibres recyclées très résistants passe par l'utilisation d'une matrice (thermoplastique) qui possède un G_{IIC} supérieur à $1,56 \text{ KJ/m}^2$. Enfin, le modèle a été exploité pour simuler le comportement d'un joint à simple recouvrement avec les caractéristiques des fibres de carbone (ensimées) et de la résine époxy.

Les modèles numériques et les propriétés de l'interface entre deux fibres ayant été validés, nous avons adapté et utilisé le modèle pour mettre en évidence l'influence de l'architecture fibreuse sur la rupture d'un composite à fibres recyclées, avec des faibles longueurs de recouvrement (5mm) représentant des défauts de l'architecture. Deux modèles numériques ont été développés pour simuler 2 types d'architecture de recouvrement : une architecture appelée joints en «escalier» où les longueurs de recouvrement sont disposées de façon asymétrique, et une architecture appelée joints en «emboîtement» pour laquelle les longueurs de recouvrement sont disposées de façon symétrique.

Les simulations sur ces 2 architectures ont permis d'obtenir les résultats suivants :

- Plusieurs défauts sont tolérables s'ils sont éloignés et positionnés à cœur. Dans ce cas la résistance du composite est très proche de celle d'un composite avec une architecture sans défaut ;
- Plusieurs configurations ont donné des résultats similaires : 1 défaut en peau \equiv 2 défauts en peau \equiv 2 défauts à cœur et proches \equiv 3 défauts répartis symétriquement \equiv 3 défauts à cœur et proches. La présence de ces défauts fait fortement chuter la résistance du composite ;
- Quelques défauts regroupés en peau et à cœur et proches sont équivalents à un matériau entièrement composé de défauts. La présence de ces défauts conduit à une très faible résistance du composite.

- 2 défauts regroupés à cœur font modérément chuter la résistance du composite ;
- 2 défauts en peau sont équivalents à un matériau entièrement composé de défauts.

Sur la base de l'ensemble de ces résultats, nous en concluons qu'il faudra éviter des architectures fibreuses qui comportent des petites longueurs de recouvrement en peau alors que des défauts à cœur sont tout à fait tolérables.

Les conditions de mise en œuvre de matériaux composites FCr + matrice thermoplastique ont été étudiées. Il a été montré que l'imprégnation des FCr par la matrice polyamide était plus facile sans ensimage car celui-ci, généralement époxy, ne permettait pas un bon mouillage. Cette conclusion est très intéressante car les fibres recyclées ne présentent généralement plus d'ensimage et l'imprégnation par une matrice thermoplastique ne nécessitera donc pas de nouvel ensimage.

Le choix des paramètres de mise en œuvre, bien que non optimisé, a permis d'obtenir des composites fibres recyclées / matrice thermoplastique avec des taux de fibres supérieurs à 50%, ce qui en fait des matériaux hautes performances. Après avoir testé différentes configurations pour la matrice (poudre, film, granulé), les meilleurs taux de fibres sont obtenus avec la matrice thermoplastique sous forme de film. Plusieurs matrices thermoplastiques ont alors été envisagées (PA, PC, PET) sur la base de 4 critères : viscosité faible à l'état fondu, G_{IIC} supérieur à G_{IIC} époxy, matrice disponible commercialement et matrice avec un faible impact environnemental ou existante à l'état recyclé.

Les premiers résultats ont montré que le G_{IIC} du PA6 et du PC sont supérieurs au G_{IIC} de la résine époxy et que l'utilisation d'une résine thermoplastique PA6 permet d'augmenter la résistance d'environ 22% pour un composite renforcé par des fibres discontinues avec un recouvrement unique de 60mm. Les caractérisations effectuées sur des composites renforcés par de « vraies » fibres de carbone recyclées d'une longueur de 100 à 150 mm réalignées par le procédé I2M (4 plis de fibres UD) ont permis de démontrer que l'utilisation d'une résine thermoplastique PA6 ou PC à la place de la résine époxy permet d'augmenter la résistance du composite. En normalisant le taux de fibres à 55% pour toutes les matrices, l'augmentation de résistance est de l'ordre de 10% à 15% par rapport à la matrice époxy.

Ces résultats valident les hypothèses de départ en démontrant qu'il est non seulement possible d'obtenir de forts taux de fibres (>50%) en imprégnant des fibres de carbone recyclées avec une matrice thermoplastique mais aussi et surtout que les caractéristiques des résines choisies ($G_{IIC} > 1,56 \text{ KJ/m}^2$) permettent d'obtenir une meilleure résistance à rupture du composite qu'avec l'utilisation d'une résine époxy.

Une analyse environnementale a été proposée sur l'exemple d'une pale d'éolienne portative en comparant les impacts de la matière première, de la fabrication et de la fin de vie d'une pièce réalisée avec différents matériaux (alliage léger, composite fibres de verre, composites à fibres recyclées). De manière générale, l'ACV comparative réalisée confirme le fort intérêt environnemental, sur l'ensemble des critères retenus, d'utiliser un composite à fibres de carbone recyclées par rapport aux matériaux classiques comme l'alliage d'aluminium ou le composite à fibres de verre. Nous avons pu aussi montrer que l'utilisation d'une matrice PA recyclée avec les fibres de carbone recyclées permet de diminuer l'impact environnemental de la pale d'éolienne par rapport aux autres solutions sur 3 critères : le potentiel de réchauffement climatique, la toxicité humaine cancérigène et la raréfaction des ressources fossiles.

Des efforts ont été déployés pour apporter de l'innovation avec un nouveau composite à fibres de carbone recyclées / matrice thermoplastique. Cette thèse a ainsi traité certains aspects importants comme l'influence de la morphologie des préformes fibreuses sur les propriétés mécaniques des interfaces fibres/matrice dans les matériaux composites à fibres

de carbone discontinues, la modélisation d'un composite avec différentes longueurs de recouvrement, l'étude du G_{IIC} des différentes matrices thermoplastiques et la performance environnementale des matériaux composites de 2ème génération à base de fibres de carbone recyclées. Cependant, de nombreux points restent encore à investiguer :

- L'énergie de rupture de l'interface (G_{IIC}) est un paramètre clé de la résistance des composites à fibres de carbone discontinues et cette valeur doit être calculée par le modèle du joint à double recouvrement. Dans cette thèse, les matrices thermoplastiques PA6, PA6&PA66, PA12, PC et PET ont été étudiées, mais il reste encore de nombreux grades de thermoplastiques à étudier, parmi lesquels certains pourraient posséder des G_{IIC} supérieurs à 1,56 KJ/m².
- Les petites longueurs de recouvrement situées en peau (défauts) ont une grande influence sur la résistance des composites à fibres de carbone discontinues. Même si on a utilisé dans ce travail des joints en «escalier» et des joints en «emboîtement» pour être représentatif des configurations réelles, les architectures fibreuses pour les composites à fibres de carbone discontinues sont plus complexes et il serait donc intéressant de réaliser des simulations numériques sur des architectures fibreuses à fibres de discontinues «réelles».
- Même si la fibre de carbone recyclée ne se substituera pas à la fibre de carbone vierge, les matériaux composites FCr avec des matrices PC ou PA6 possèdent de meilleures performances que les composites à base de fibres de verre ou les alliages légers. Ces nouveaux matériaux composites à fibres de carbone discontinues peuvent donc être utilisés pour fabriquer des pièces sollicitées mécaniquement sans augmentation de coût, par exemple dans les domaines de l'automobile, l'aéronautique, les équipements d'énergie éolienne.
- Enfin, la substitution de fibres de verre ou d'alliage léger par de la fibre de carbone recyclée réalignée sur des produits sollicités mécaniquement entraîne une diminution de l'impact environnemental. Pour être le plus performant possible au niveau de l'impact environnemental, il sera nécessaire d'élaborer des composites à FCr renforcés par des matrices thermoplastiques recyclées.

Bibliographie

[M.H. Akonda et al., 2012] M.H. Akonda, C.A. Lawrence, B.M. Weager, Recycled carbon fibre-reinforced polypropylene thermoplastic composites, *Composites: Part A*, **43** 79–86, 2012

[MH Akonda et al., 2014] MH Akonda, HM EL-Dessouky, CA Lawrence and BM Weager, A novel non-crimped thermoplastic fabric prepreg from waste carbon and polyester fibres, *Journal of Composite Materials*, **48**(7) 843–851, 2014

[Aquafil, 2014] Aquafil Group, EPD for Aquafil Econyl, Rev.1,20, 2014

[P. Aravindan et al., 2020] P. Aravindan, F. Becagli, M.L. Longana, L.G. Blok, T.R. Pozegic, S.J. Huntley, T. Rendall, I. Hamerton, Remanufacturing of Woven Carbon Fibre Fabric Production Waste into High Performance Aligned Discontinuous Fibre Composites, *Journal of Composites Science*, **4**(2), 68, 2020

[M. Arhant, 2016] M. Arhant, Thermoplastic Composites for Underwater Applications, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes (ECN), France

[ARKEMA] Fiche technique pour Rilsamid® AMNO P40 TLD - PA12 : <https://www.campusplastics.com/campus/zh/datasheet/Rilsamid%C2%AE+AMNO+P40+TLD/ARKEMA/179/0c6b8be5>

[M.L. Benzeggagh et al., 1996] M.L. Benzeggagh, M. Kenane, Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus, *Composites Sciences and Technology*, **56**, 439-449, 1996

[N. Bernet et al., 2001] N. Bernet, V. Michaud, P.E. Bourban, J.A.E. Manson, Commingled yarn composites for rapid processing of complex shapes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **32**(11), 1613-1626, November 2001

[E.C. Bothelho et al., 2003] E.C. Botelho, L. Figiel, M.C. Rezende, B. Lauke, Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites, *Composites Science and Technology*, **63**, 1843–1855, 2003

[M. Boulanghien, 2014] M. Boulanghien, Formulations de composites thermoplastiques à partir de fibres de carbone recyclées par vapo-thermolyse, Thèse de doctorat, École des Mines d'Albi-Carmaux, 2014

[I. Boustead, 2005] I. Boustead, Eco-profiles of the European Plastics Industry. *PlasticsEurope*, 2005

[S. Chataigner, 2008] S. Chataigner, Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008

[Covestro AG] Fiche technique pour Makrolon® LED2245 – PC : <https://www.campusplastics.com/campus/zh/datasheet/Makrolon%C2%AE+LED2245/Covestro+Deutschland+AG/22/c9397d61>

[M. Dauguet et al., 2015] M. Dauguet, O. Mantaux, N. Perry, YF. Zhao, Recycling of CFRP for high value applications, *Procedia CIRP*, **29**, 734-739, 2015

[J.F. Devaux et al., 2011] J.F. Devaux, G. Lê, B. Pees, Application of Eco-Profile Methodology To Polyamide 11, *Journal of Arkema: Colombes, France*, 2011

[G. Doka, 2003] G. Doka, Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. *Journal of final report ecoinvent*, **13**, 2003

[H.M. El-Dessouky et al., 2019] H.M. El-Dessouky, B. Liu, M.N. Saleh, R.J. Scaife, Co-woven carbon and nylon fibres for manufacturing thermoplastic composite plaques, *Procedia CIRP*, **85**, 272-276, 2019

[EMS] <https://www.campusplastics.com/campus/fr/datasheet/Grilon+AS+V0/EMS-GRIVORY/61/6cedfde1/US>, Fiche technique Grilon AS V0

[Environnement-Magazine, 2015] Composites : recyclage par solvolysse (2015), <https://www.environnement-magazine.fr/recyclage/article/2015/08/14/44618/composites-recyclage-par-solvolysse>

[P. Feraboli et al., 2010] P. Feraboli, T. Cleveland, P. Stickler, J. Halpin, Stochastic laminate analogy for simulating the variability in modulus of discontinuous composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **41**(4), 557–570, 2010

[Fraunhofer, 2016] CFRP – Recycling and sustainability: Near-Net-Shape fabrication-technologies for CFRP (2016), <https://vdocument.in/reader/full/rethink-cfrp-recycling-and-sustainability-near-net-shape-casting-composite>

[C. Froemder et al., 2018] C. Froemder, K. Kirwan, N. Reynolds, P. R. Wilson, F. C. Fernandes, S.R. Coles, Investigation of the Processability of Hybrid Thermoplastic Nonwoven including Recycled Carbon Fibre through Fast Stamping, SAMPE Europe Conference 2018 Southampton

[G-TEX TM] G-TEX TM Technical Data Sheet, Gen2Carbon, <https://www.gen2carbon.com/wp-content/uploads/2021/10/G2C-Data-Sheet-G-TEX-TM-V2.pdf>

[G. Gardiner, 2014] G. Gardiner, Recycled carbon fiber update: Closing the CFRP lifecycle loop (2014), <https://www.compositesworld.com/articles/recycled-carbon-fiber-update-closing-the-cfrp-lifecycle-loop>

[D. Gay, 1997] D. Gay, *Matériaux composites* (4ème édition), Paris : Hermès, 1997

[K. Giannadakis et al., 2011] K. Giannadakis, M. Szpieg, J. Varna, Mechanical Performance of a Recycled Carbon Fibre/PP Composite, *Experimental Mechanics*, **51**, 767–777, 2011

[A. Gillet et al., 2013] A. Gillet, O. Mantaux, Interaction microstructure/propriétés dans un matériau composite à fibres de carbone recyclées, 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013, Bordeaux

[A. Gillet et al., 2014] A. Gillet, O. Mantaux, P. Pomiers, Opportunities of achieving performance composite parts with recycled carbon fibres, ECCM16 - 16TH European Conference on Composite Materials, 22-26, 2014

[A. Gillet et al., 2015] A. Gillet, O. Mantaux, G. Cazaurang, Characterization of composite materials made from discontinuous carbon fibres within the framework of composite recycling, *Composites Part A*, **75**, 89–95, August 2015

[GlassFibreEurope, 2016] GlassFibreEurope, Life cycle assessment of CFGF –Continuous Filament Glass Fibre Products, 2016

[W. Glenz, 2007] W. Glenz, Polyethylen terephthalat (PET), **97**(10), 76-80, 2007

[W.J. Groot et al., 2010] W.J. Groot, T. Borén, Life cycle assessment of the manufacture of lactide and PLA biopolymers from sugarcane in Thailand, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **15**(9), 970-984, 2010

[J.C. Halpin, 1969] J.C. Halpin, Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites, *Journal of Composite Materials*, **3**(4), 732–734, 1969

- [J.C. Halpin et al., 1976] J.C. Halpin, J.L. Kardos, The halpin-tsai equations: a review polymer engineering and science, *Journal of Composite Materials*, **16**, 344–352, 1976
- [H. Han et al., 2012] H. Han, X. Wang, D. Wu, Preparation, crystallization behaviors, and mechanical properties of biodegradable composites based on poly (L-lactic acid) and recycled carbon fiber, *Composites: Part A*, **43**, 1947–1958, 2012
- [M.M.B. Hasan et al., 2017] M.M.B. Hasan, S. Nitsche, A. Abdkader and C. Cherif, Properties of CF/PA6 friction spun hybrid yarns for textile reinforced thermoplastic composites, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **254**, 2017
- [M.M.B. Hasan et al., 2018] M.M.B. Hasan, S. Nitsche, A. Abdkader, C. Cherif, Carbon fibre reinforced thermoplastic composites developed from innovative hybrid yarn structures consisting of staple carbon fibres and polyamide 6 fibres, *Composites Science and Technology*, **167**, 379–387, 2018
- [M.M.B. Hasan et al., 2019] M.M.B. Hasan, A. Abdkader, C. Cherif, F. Spennato, Fibre hybrid composites consisting of discontinuous waste carbon fibre and continuous glass filaments developed for load-bearing structures with improved impact strength, *Composites Part A*, **126**, 105610, 2019
- [D. He et al., 2021] D. He, V.K. Soo, H.C. Kim, M. Doolan, Life Cycle Primary Energy Demand and Greenhouse Gas Emission benefits of vehicle lightweighting with recycled carbon fibre, *Procedia CIRP*, **98**, 43-48, 2021
- [M. Hengstermann et al., 2016] Hengstermann M, Hasan MMB, Abdkader A, Cherif C., Influence of Fibre Length and Preparation on Mechanical Properties of Carbon Fibre/Polyamide 6 Hybrid Yarns and Composites., *Fibres & Textiles in Eastern Europe*; **24**, 5(119), 55-62, 2016
- [C. Hill et al., 2019] C. Hill, A. Norton, Report: LCA database of environmental impacts to inform material selection process, 2019
- [M.C. Johnson et al., 2014] M.C. Johnson, J.L. Sullivan, Lightweight materials for automotive application: an assessment of material production data for magnesium and carbon fiber, Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2014
- [I. Karbownik et al., 2015] I. Karbownik, O. Rac, M. Fiedot, S.W. Patrycja, H. Teterycz, In situ preparation of silver–polyacrylonitrile nanocomposite fibres, *European Polymer Journal*, **69**, 385-395, 2015
- [H. Khayyam et al., 2020] H. Khayyam, R.N. Jazar, S. Nunna et al., PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: experimental and mathematical modelling. *Progress in Materials Science*, **107**, 100575, 2020
- [J. Kratz et al., 2017] J. Kratz, Y.S. Low, B. Fox, Resource-friendly carbon fiber composites: combining production waste with virgin feedstock, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, **3**(4), 121-129, 2017
- [J. Lachaud et al., 2008] J. Lachaud, N. Mansour, S. White, B. Laub, JM. Bouilly, Modélisation de la pyrolyse d'un matériau composite, *Actes du congrès SFT (Société Française de Thermique) 2008*, 2008
- [S. Li et al., 2010] S. Li, E. Worrell, E. M.K. Patela, Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, **55**(1), 34–52, 2010
- [Y. Li et al., 2017] Y. Li, S. Pimenta, J. Singgih, S. Nothdurfter, K. Schuffenhauer, Experimental investigation of randomly-oriented tow-based discontinuous composites and

their equivalent laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **102**, 64–75, 2017

[Z. Liu et al., 2021] Z. Liu, A.T. Turner, K.H. Wong, S.J. Pickering, Development of high performance recycled carbon fibre composites with an advanced hydrodynamic fibre alignment process, *Journal of Cleaner Production*, **278**, 2021

[M. L. Longana et al., 2016] M.L. Longana, N. Ong, N.H Yu, K.D. Potter, Multiple closed loop recycling of carbon fibre composites with the HiPerDiF (High Performance Discontinuous Fibre) method *Composite Structures*, **153**, 271–277, 2016

[M. L. Longana et al., 2019] M. L. Longana, H.Yu, J. Lee, T. R. Pozegic, S. Huntley, T. Rendall, K. D. Potter and I. Hamerton, Quasi-Isotropic and Pseudo-Ductile Highly Aligned Discontinuous Fibre Composites Manufactured with the HiPerDiF (High Performance Discontinuous Fibre) Technology, *Materials*, **12**(11), 1794, 2019

[LyondellBasell] Fiche technique pour SCHULAMID® 6 MV 14 - PA6 :

<https://www.campusplastics.com/campus/fr/datasheet/SCHULAMID%C2%AE+6+MV+14+FR/LyondellBasell/103/3bb80e81>

[Y. Ma et al., 2018] Y. Ma, S. Jin, M. Ueda, T. Yokozeki, Y. Yang, F. Kobayashi, H. Kobayashi, T. Sugahara, H. Hamada, Higher performance carbon fiber reinforced thermoplastic composites from thermoplastic prepreg technique: Heat and moisture effect, *Composites Part B*, **154**, 90–98, 2018

[V. Matrenichev et al., 2020] V. Matrenichev, M.C. Lessa Belone, S. Palola, P. Laurikainen, E. Sarlin, Resizing Approach to Increase the Viability of Recycled Fibre-Reinforced, *Composites Materials*, **13**(24), 5773, 2020

[P. McDonnell et al., 2001] P. McDonnell, K.P. McGarvey, L. Rochford, C.M.Ó. Brádaigh, Processing and mechanical properties evaluation of a commingled carbon-fibre/PA-12 composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **32**(7), 925-932, July 2001

[F. Meng et al., 2020] F. Meng, Y. Cui, S. Pickering, J. Mckechnie, From aviation to aviation: Environmental and financial viability of closed-loop recycling of carbon fibre composite, *Composites Part B: Engineering*, **200**, 108362, 2020

[C. Morin et al., 2012] C. Morin, A. Loppinet-Serani, F. Cansell, C. Aymonier, Near and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art, *Journal of Supercritical Fluids*, **66**, 232-240, 2012

[G. Oliveux et al., 2017] G. Oliveux, J.L. Bailleul, A. Gillet, O. Mantoux, G. Leeke, Recovery and reuse of discontinuous carbon fibres by solvolysis: Realignment and properties of remanufactured materials, *Composites Science and Technology*, **139**(8), 99–108, 2017

[S.J. Pickering et al., 2016] S.J. Pickering, Z. Liu, T.A. Turner, K.H. Wong, Applications for carbon fibre recovered from composites, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **139**, 012005, 2016

[S. Pimenta et al., 2014] S. Pimenta, P. Robinson, An Analytical Shear-Lag Model for Composites with 'Brick-and-Mortar' Architecture Considering Non-Linear Matrix Response and Failure, *Composites Science and Technology*, **104**, 111-124, 2014

[Petcore, 2009] Petcore. PETCORE publishes PET collection figures for 2008; 2009b. <http://www.petcore.org/intranet/Common/GetFile.asp?PortalSource=558&DocID=12352&mfd=off&pdoc=1> [accessed on 26 Nov 2009]

- [B. Pillain et al., 2019] B. Pillain, P. Loubet, F. Pestalozzi, J. Woidasky, A. Erriguible, C. Aymonier, G. Sonnemann, Positioning supercritical solvolysis among innovative recycling and current waste management scenarios for carbon fiber reinforced plastics thanks to comparative life cycle assessment, *The Journal of Supercritical Fluids*, **154**, 104607, 2019
- [PlasticsEurope, 2009] PlasticsEurope, *The Compelling Facts About Plastics 2009: an analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008, 2009*
- [S. Pompidou et al., 2013] S. Pompidou, M. Princaud, H. Adrianakaja, G. Sonneman, N. Perry, Viabilisation du recyclage de composites à renfort carbone et matrice thermodurcissable, Premiers éléments d'étude, In *Congrès Français de Mécanique*, 1-6, 2013
- [M. Princaud et al., 2013] M. Princaud, S. Pompidou, H. Adrianakaja, G. Sonneman, N. Perry, Making viable the recycling of carbon fiber/thermoset matrix composites. First elements of study, 6th International Conference on Life Cycle Management, 2013
- [M. Princaud et al., 2014] M. Princaud, S. Pompidou, N. Perry, G. Sonneman, C. Aymonier, A. Serani, The recycling of OMC's carbon reinforcement by solvolysing thermoset matrix. A way of sustainability for composites, ECCM16 - 16TH European Conference on Composite Materials, 2014
- [M. Princaud et al., 2014] M. Princaud, C. Aymonier, A. Serani, N. Perry, G. Sonneman, Environmental Feasibility of the Recycling of Carbon Fibers from CFRPs by Solvolysis Using Supercritical Water, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2**(6), 1498-1502, 2014
- [O. Rimmel et al., 2019] O. Rimmel, D. May, C. Goergen, A. Poeppel, P. Mitschang, Development and validation of recycled carbon fiber-based binder tapes for automated tape laying processes, *Journal of Composite Materials*, **53**(23), 3257–3268, 2019
- [F. Ronkay et al., 2017] F. Ronkay, B. Molnar, G. Dogossy, The effect of mold temperature on chemical foaming of injection molded recycled polyethylene-terephthalate, *Thermochimica Acta*, **651**, 65-72, 2017
- [K. Stoeffler et al., 2013] K. Stoeffler, S. Andjelic, N. Legros, J. Roberge, S.B. Schougaard, Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber, *Composites Science and Technology*, **84**, 56-71, 2013
- [T. Suzuki et al., 2005] T. Suzuki, J. Takahashi, Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars, *The Ninth Japan International SAMPE symposium*, **9**, 14–19, 2005
- [R. J. Tapper et al., 2018] R.J. Tapper, M.L. Longana, H. Yu, I. Hamerton, K.D. Potter, Development of a closed-loop recycling process for discontinuous carbon fibre polypropylene composites, *Composites Part B*, **146**, 222–231, 2018
- [R. J. Tapper et al., 2019] R.J. Tapper, M.L. Longana, I. Hamerton, K.D. Potter, A closed-loop recycling process for discontinuous carbon fibre polyamide 6 composites, *Composites Part B: Engineering*, **179**, 107418, 2019
- [R.J. Tapper et al., 2020] R.J. Tapper, M.L. Longana, A. Norton, K.D. Potter, I. Hamerton, An evaluation of life cycle assessment and its application to the closed-loop recycling of carbon fibre reinforced polymers. *Composites Part B: Engineering*, **184**, 107665, 2020
- [T.A. Turner et al., 2010] T.A. Turner, N.A. Warrior, S.J. Pickering, Development of high value moulding compounds from recycled carbon fibres, *Plastics, rubber and composites*, **39**(3-5), 151-156, 2010

- [A. Turon et al., 2006] A. Turon, P.P. Camanho, J. Costa, C.G. Dávila, A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading, *Mechanics of Materials*, **38**,1079–89, 2006
- [H.J. Um et al., 2021] H.J. Um, Y.T. Hwang, K.H. Choi, H.S. Kim, Effect of crystallinity on the mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyethylene-terephthalate (CF/PET) composites considering temperature conditions, *Composites Science and Technology*, **207**,108745, 2021
- [K. Vladimír et al.,2012] K. Vladimír, T. Loubal, LCA of liquid epoxy resin produced based on propylene and on glycerin, *Journal of Acta Environmentalica Universitatis Comenianae*, **20**(1), 62-67, 2012
- [Y. Wan et al., 2016] Y. Wan, J. Takahashi, Tensile properties and aspect ratio simulation of transversely isotropic discontinuous carbon fiber reinforced thermoplastics, *Composites Science and Technology*, **137**, 167-176, 2016
- [N. Van de Werken et al., 2019] N. Van de Werken, M.S. Reese, M.R. Taha, Mehran Tehrani, Investigating the effects of fiber surface treatment and alignment on mechanical properties of recycled carbon fiber composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **119**, 38–47, 2019
- [B.H. Wick, 1954] B.H. Wick, Study of the Subsonic Forces and Moments on an Inclined Plate of Infinite Span, Technical Report. TN 3221, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, USA.,1954
- [M.R. Wisnom.,1992] M.R. Wisnom, On the Increase in Fracture Energy with Thickness in Delamination of Unidirectional Glass Fibre-Epoxy with Cut Central Plies, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **11**(8), 897-909, 1992
- [R.A. Witik et al., 2013] R.A. Witik, R. Teuscher, V. Michaud, C. Ludwig, J.A.E. Månson, Carbon fibre reinforced composite waste: an environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **49**, 89-99, 2013
- [J. Wölling et al., 2017] J. Wölling, M. Schmiege, F. Manis, K. Drechsler, Nonwovens from recycled carbon fibres – comparison of processing technologies, *Procedia CIRP* **66**, 271 – 276, 2017
- [K.H.Wong et al., 2012] K.H. Wong, D.S. Mohammed, S.J. Pickering, R. Brooks, Effect of agents on reinforcing potential of recycled carbon fibre for polypropylene composite, *Composites Science and Technology*, **72**, 835-844, 2012
- [B. Xiao et al., 2019] B. Xiao, T. Zaima, K. Shindo, T. Kohira, J. Morisawa, Y. Wan, G. Yin, I. Ohsawa, J. Takahashi, Characterization and elastic property modeling of discontinuous carbon fiber reinforced thermoplastics prepared by a carding and stretching system using treated carbon fibers, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **126**, 2019
- [E. Yildirim et al., 2015] E. Yildirim, N. Miskolczi, J.A. Onwudili, K.E.N. EMETH, P.T. Williams, J. Sója, Evaluating the mechanical properties of reinforced LDPE composites made with carbon fibres recovered via solvothermal processing, *Composites Part B*, **78**, 393-400, 2015
- [H. Yuan et al., 2004] H. Yuan, J.G. Tenga, R. Seracino, Z.S. Wud, J. Yao, Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints, *Engineering Structures*, **26**, 553-565, 2004

Résumé :

Depuis leur industrialisation, la production de composites en fibres de carbone augmente de façon continue. Lors du recyclage des composites à fibres de carbone, seules les fibres seront recyclées. La « suppression » de la matrice est réalisée par pyrolyse, solvolysse ou vapo-thermolysse, procédés qui n'entraînent que peu de dégradation des fibres. Afin de susciter une demande pour les fibres de carbone recyclées, il faut donner de la valeur ajoutée aux fibres recyclées en démontrant la faisabilité de fabriquer des pièces composites (fibre recyclée+matrice) de haute qualité.

Les architectures de fibres recyclées semi longues avec un très bon alignement ont été produites par la technologie de réalignement brevetée du laboratoire qui permet d'assurer une exploitation optimale des propriétés des fibres de carbone recyclées. Dans le but de maîtriser et d'optimiser les propriétés du nouveau composite (à fibres discontinues), les mécanismes de transfert de charge entre fibres ont été étudiés, et les propriétés utiles de la matrice ont été identifiées. Une attention particulière a été portée au calcul de la longueur de transfert de charge entre deux fibres discontinues en fonction des propriétés de l'interface fibre recyclée / matrice thermoplastique. En effet, notre objectif est non seulement de rechercher des solutions optimales en termes de résistance mais aussi des solutions qui permettent de limiter l'impact environnemental, d'où notre choix des matrices thermoplastiques (y compris recyclées) pour cette étude.

Tous les résultats des simulations numériques ont été validés par comparaison avec des résultats expérimentaux. De plus des composites fibres de carbone recyclées/matrice thermoplastique (PA6 et PC) ont été mis en œuvre et testés. Ces matériaux présentent des taux de fibres supérieurs à 50% et offrent de meilleures propriétés mécaniques que les mêmes matériaux avec matrice époxy.

Une analyse environnementale a été proposée sur l'exemple d'une pale d'éolienne portable en comparant les impacts de la matière première, de la fabrication et de la fin de vie d'une pièce réalisée avec différents matériaux (alliage léger, composite fibres de verre, composites à fibres recyclées). Cela démontre l'intérêt des fibres de carbone recyclées associées à une matrice thermoplastique recyclée, pour minimiser l'impact environnemental tout en maximisant les performances mécaniques.

Mots clés :

Composites fibres de carbone recyclées / matrices thermoplastiques – Interfaces fibre recyclée discontinue / matrice – Impact environnemental

Abstract:

Since their industrialization, the production of carbon fiber composites is continuously increasing. When recycling carbon fiber composites, only the fibers are recycled. The matrix is "removed" by pyrolysis, solvolysis or vapour-thermolysis, processes that cause little degradation of the fibres. In order to create a demand for recycled carbon fibers, it is necessary to add value to recycled fibers by demonstrating the feasibility of manufacturing high quality composite parts (recycled fiber + matrix). Semi-long recycled fiber architectures with very good alignment were produced by the laboratory's patented realignment technology that ensures optimal exploitation of recycled carbon fiber properties. In order to control and optimize the properties of the new composite (staple fiber), the mechanisms of load transfer between fibers were studied, and the useful properties of the matrix were identified. Particular attention has been paid to the calculation of the load transfer length between two staple fibers as a function of the properties of the recycled fiber/thermoplastic matrix interface. Indeed, our objective is not only to find optimal solutions in terms of strength but also solutions that allow to limit the environmental impact, hence our choice of thermoplastic matrices (including recycled) for this study.

All the results of the numerical simulations were validated by comparison with experimental results. In addition, recycled carbon fiber/thermoplastic matrix composites (PA6 and PC) were implemented and tested. These materials have fiber contents higher than 50% and offer better mechanical properties than the same materials with epoxy matrix.

An environmental analysis was performed on the example of a portable wind turbine blade by comparing the impacts of the raw material, manufacturing and end of life of a part made with different materials (light alloy, glass fiber composite, recycled fiber composites). This demonstrates the interest of recycled carbon fibers associated with a recycled thermoplastic matrix, to minimize the environmental impact while maximizing mechanical performance.

Key words:

Recycled carbon fiber/thermoplastic matrix composites - Staple recycled fiber/matrix interfaces - Environmental impact