



CentraleSupélec

CONCEPTION ET FABRICATION AÉRONAUTIQUE
STUDY CASE

Les matériaux composites dans l'industrie aéronautique

Élèves :

Matteo CUTRONE
Camille LAGET
Thomas LEBUFFE
Solène MOLINÈS
Simon TOLLIS

Enseignants :

Paul KOU
Caroline LECLEAC'H
Marie PÉTREQUIN

9 janvier 2025

Table des matières

1	Présentation et pertinence dans le secteur aéronautique	2
1.1	Constitution et performances des matériaux composites	2
1.2	Pertinence dans le secteur aéronautique	2
2	Industrialisation	4
2.1	Problématiques humaines liées à la mise en place industrielle	4
2.2	Processus de fabrication	5
2.3	Problématiques de fixations liées à la mise en place industrielle	6
2.4	Maintenance et réparabilité	7
2.5	Renforcement des structures existantes	8
3	Recyclage des composites	8
3.1	Procédé thermique	8
3.2	Procédé mécanique	9
3.3	Procédé chimique	9
4	Risques pour la santé et la sécurité au travail	10
4.1	Santé	10
4.2	Sécurité	10
5	Limites des matériaux composites	11
6	Conclusion	11
	Bibliographie	12

1 Présentation et pertinence dans le secteur aéronautique

1.1 Constitution et performances des matériaux composites

Les matériaux composites sont un assemblage de deux matériaux chimiquement et physiquement compatibles, permettant une adhésion entre eux, et qui se complètent d'un point de vue mécanique. Ils se constituent d'une matrice, souvent en polymères comme de la résine epoxy, ou des polymères thermodurcissables ou thermoplastiques, ainsi que de fibres ou renforts, par exemple en verre ou en carbone.

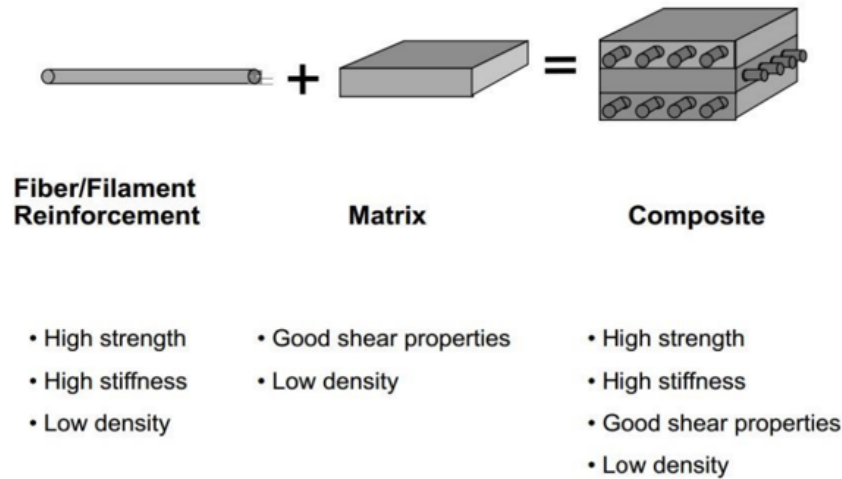


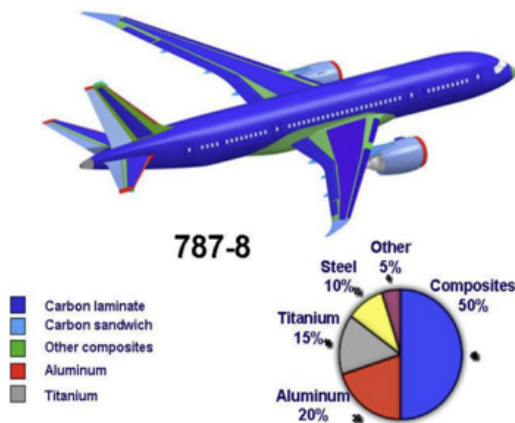
FIGURE 1 – Constitution des matériaux composites, issue de [9]

Les performances résultants de ces assemblages composites sont principalement les suivantes :

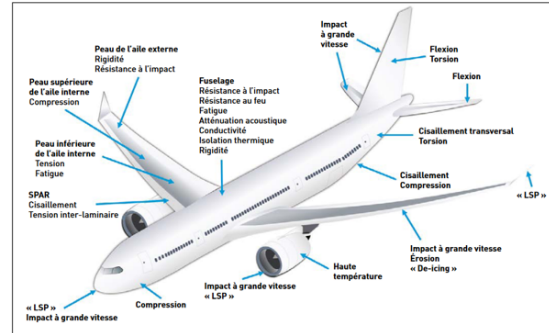
- une rigidité accrue
- une spécificité et une légèreté très avantageuses
- une flexibilité de design multipliant leurs domaines d'usage
- une grande résistance à la fatigue

1.2 Pertinence dans le secteur aéronautique

Les avions récents sont aujourd'hui à 50% constitués de composites. De part les contraintes physiques extrêmes auxquelles les avions sont soumis, au sol, au décollage ou en vol, l'utilisation des composites présente une solution très avantageuse aux différentes problématiques soulevées par la fatigue, les contraintes en flexion-compression, les contraintes thermiques, ...



(a) Répartition des matériaux dans un avion



(b) Efforts exercés sur les différentes parties de l'avion

De plus, l'industrie aéronautique est soumise à des contraintes de masse très importantes : le kilogramme gagné en vol peut se payer jusqu'à 500€ dans l'aviation civile, et jusqu'à 10 000€ dans le spatial.

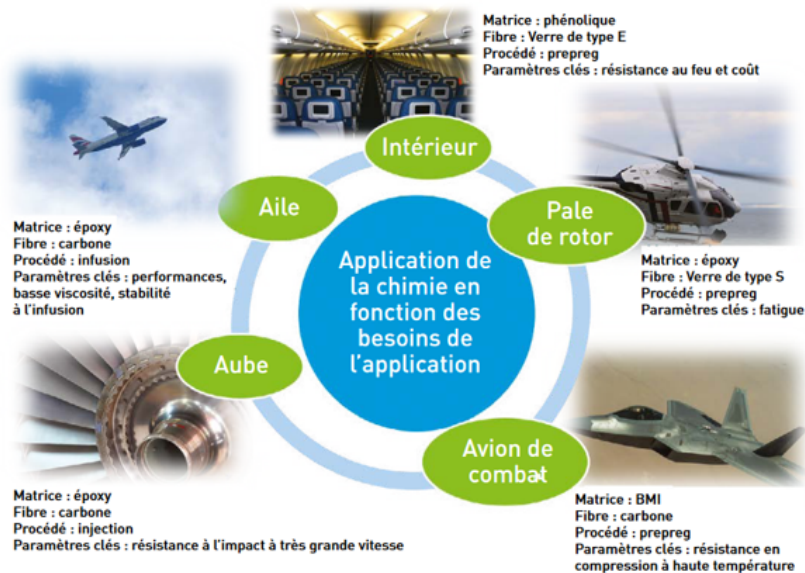


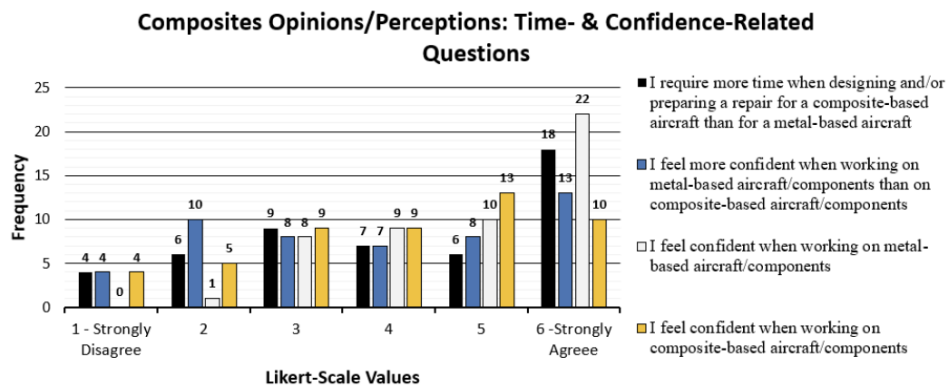
FIGURE 3 – Différentes applications des matériaux composites dans l'avion

Les matériaux composites apparaissent ainsi comme un matériau de grand intérêt dans les choix de conception qui découlent de ces contraintes. Leur rapport résistance/poids s'avère 20% plus efficace que celui des métaux qu'ils commencent à remplacer, et le gain de masse résultant permet une diminution notable de la consommation de carburant. Leurs applications polyvalentes permettent un usage à des fins structurales mais aussi électroniques, à travers les composites dits intelligents. Leur grande résistance chimique aux solvants, comme le jet fuel ou les solvants à peinture permet une praticité accrue : lors de la vente d'un avion d'une compagnie à l'autre, retirer le logo de la première s'avère beaucoup plus facile. Leur résistance thermique est également un avantage non négligeable de leur insertion dans la conception des pièces de l'avion.

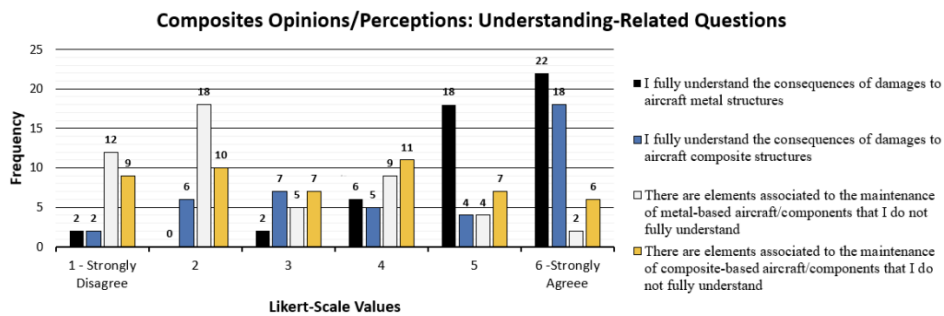
2 Industrialisation

2.1 Problématiques humaines liées à la mise en place industrielle

La Figure 4 présente les résultats d'une étude réalisée par la *University Aviation Association*, issue de l'article [16], qui a interrogé des compagnons dans les domaines de la production et de la maintenance pour comparer le travail sur les matériaux métalliques et composites. Les conclusions révèlent que l'utilisation des composites pose un défi supplémentaire, augmentant le niveau de stress. Cette situation peut être attribuée à la délicatesse des matériaux composites, qui sont plus susceptibles de se rayer et de se casser que les matériaux métalliques traditionnellement utilisés. De plus, leur réparation est significativement plus complexe, comme nous l'examinerons dans une section suivante. Par conséquent, une manipulation plus précautionneuse est requise, ce qui engendre du stress pour les compagnons.



(a) Niveau de confiance dans la manipulation des matériaux composites



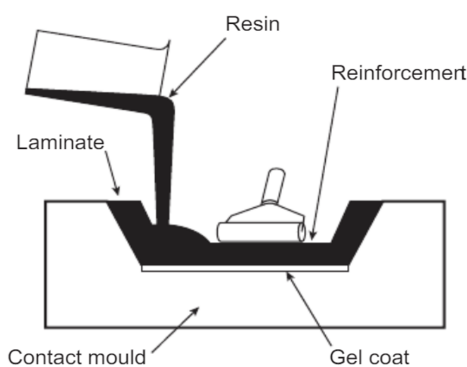
(b) Niveau de compréhension sur les matériaux composites

FIGURE 4 – Résultats d'un sondage portant sur les compagnons d'une ligne d'assemblage et de maintenance sur le travail avec les matériaux composites, issu de [16]

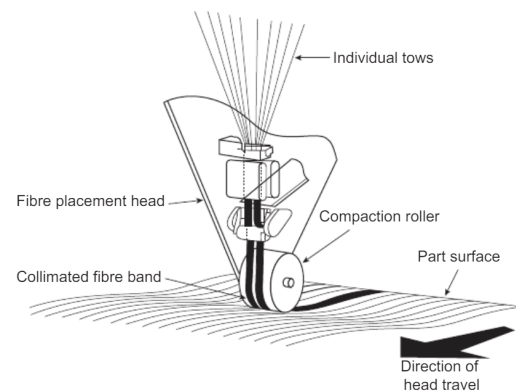
Cette étude soulève également des préoccupations quant à la formation des praticiens aux nouvelles techniques de fabrication. En réponse à ces besoins spécifiques, de nouveaux métiers tels que celui d'opérateur en matériaux composites ont émergé.

2.2 Processus de fabrication

La technique la plus répandue pour fabriquer des matériaux composites utilise des produits semi-finis appelés "préimprégnés" (ou "prepreg" en anglais). Ce sont des feuilles constituées de résine thermodurcissable et de fibres (renforts) déjà orientées. Il convient alors de les superposer en les liant avec de la résine, avant de les placer sous vide (pour maintenir en place le système) et dans un autoclave pour les solidifier. Puisque les pièces aéronautiques peuvent atteindre des tailles importantes, les autoclaves doivent aussi être suffisamment grands pour les accueillir. La phase de solidification en autoclave peut ainsi représenter une limitation pour la fabrication de composites. Étant donné que les composants d'épaisseur similaire doivent être traités selon le même cycle de cuisson, une bonne planification de la production est cruciale pour le succès de l'opération [8].



(a) Technique de fabrication manuelle

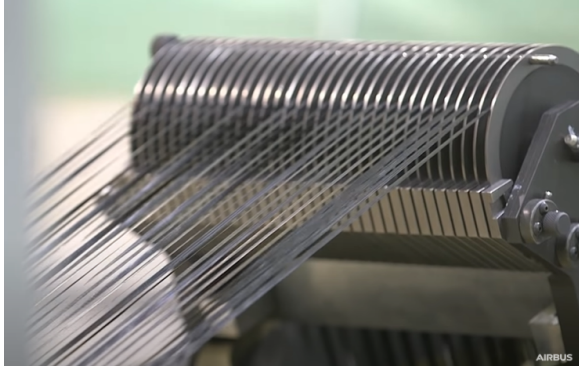


(b) Technique de fabrication automatique

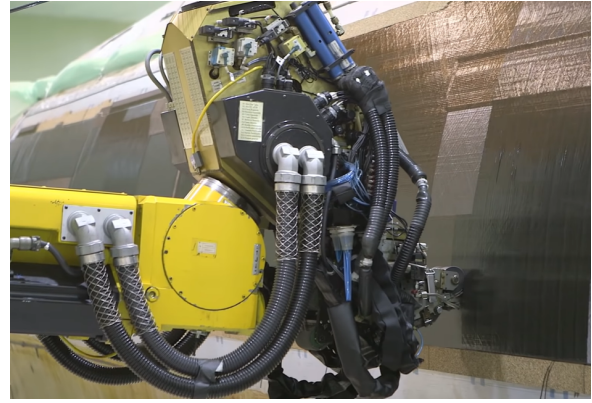
FIGURE 5 – Techniques de fabrication des matériaux composites, issu de [12]

Cette méthode manuelle utilisant des composants préimprégnés peut être utilisée pour fabriquer des composants composites de haute performance, de petite à moyenne échelle. Cependant, elle n'est plus appropriée pour la fabrication de grandes pièces telles que des ailes ou des sections de fuselage et trouve ses limites également en terme de rendement. Pour ce faire, des méthodes de fabrication automatiques ont été mises en place. En particulier, nous nous sommes intéressés à la méthode de "Placement automatique de fibres" ("Automated Fiber Placement" en anglais) illustré sur la Figure 5b. Par exemple, les ailes supérieures et inférieures, des longerons, ainsi que des structures des Boeing 787 et Airbus A350 sont fabriquées avec cette méthode, de même que les empennages des Boeing 777, Airbus A340 et A380.

Dans cette méthode, les fibres (Figure 6a) et la résine sont mélangées par le robot de drapage (Figure 6b) et injectées de manière automatique sous forme de rubans préimprégnés sur la géométrie souhaitée. La pose est suspendue par intervalles et le composant partiellement achevé est consolidé sous pression. Les sections de la structures sont ensuite soumises à une cuisson sous autoclave, cette fois sans pression appliquée. L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le coût élevé des équipements requis. Cependant, en plus de répondre aux exigences de précision et de répétabilité, cette technique de fabrication permet de réaliser des géométries plus complexes.



(a) Fibres injectées par le robot de drapage



(b) Robot de drapage (Airbus, Illescas)

FIGURE 6 – Illustration de la méthode de Placement automatique de fibre, d'après une vidéo de Airbus [1]

2.3 Problématiques de fixations liées à la mise en place industrielle

Le rivetage est une méthode d'assemblage prédominante pour les structures d'aéronefs, en raison de ses avantages tels que sa simplicité d'utilisation, sa capacité à relier différents matériaux (par exemple, des métaux avec des matériaux non-métalliques), ainsi que sa fiabilité [14]. Cependant, les connexions rivetées dans les structures composites de l'avion présentent des défis, notamment en ce qui concerne l'initiation et la propagation des dommages mécaniques. Par exemple, la Figure 7 illustre des dégradations mécaniques apparues à la suite d'essais de traction sur structures composites avec des écrous rivetés pour deux types d'orientation de fibres (perpendiculaires et obliques). On observe des fissures dans la matrice, des délaminations et des ruptures de fibres, qui se propagent dans la direction du renforcement et peuvent entraîner des défaillances potentiellement dangereuses pour l'avion.

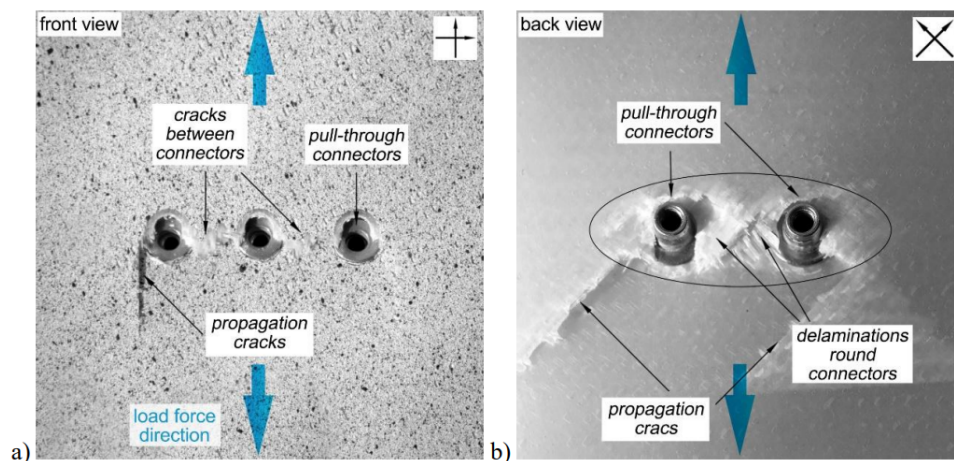


FIGURE 7 – Dégradations mécaniques dans le composite suite au rivetage, issue de [4]

C'est pourquoi, la mise en place industrielle des matériaux composites nécessite de trouver des alternatives au rivetage comme technique de fixation. Les principales alternatives

utilisées dans l'industrie sont les suivantes :

- Intégration des fixations directement dans le composite. Dans ce cas, les fixations sont incorporées dans le moule du composite lors du processus de fabrication (Figure 8a).
- Soudure par induction entre deux pièces fabriquées en composites thermoplastiques. Ce processus permet de réduire de 75% le nombre de rivets utilisés diminuant ainsi le poids de 15 %. La suppression des rivets entraîne également des gains de temps lors de la production et de l'assemblage. Ce procédé, qui est déjà en service, est impliqué dans plusieurs programmes aéronautiques, notamment chez Daher [15], Figure 8b.
- Utilisation d'adhésifs structuraux. L'avantage de cette technique par rapport aux deux précédentes est une distribution de la contrainte sur toute la surface. En effet, les rivets ou la soudure par points peuvent créer des concentrations de contraintes engendrant ainsi des points faibles dans le composite (Figure 8c).

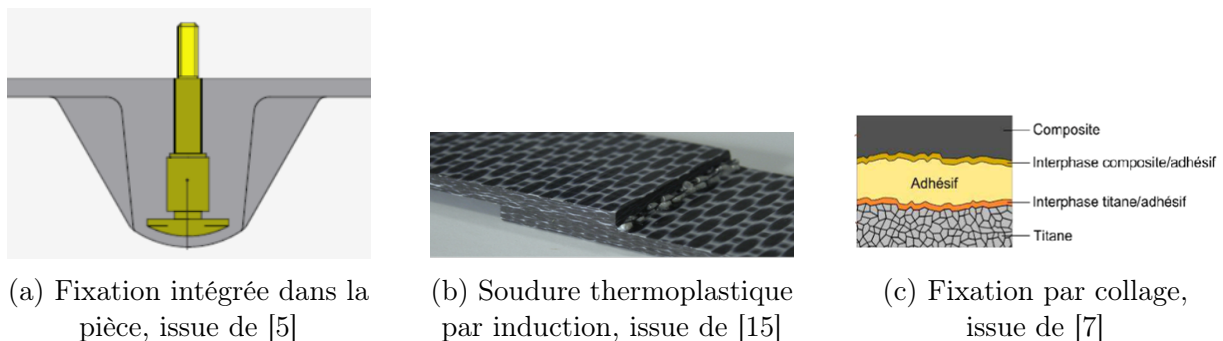


FIGURE 8 – Trois alternatives au rivetage utilisées en industrie

2.4 Maintenance et réparabilité

La réparabilité représente un défi majeur pour les composites en général. En effet, les procédures de réparation diffèrent considérablement entre les structures métalliques et les composites. En cas de dommages sur une structure métallique, il est souvent suffisant de fixer un morceau de tôle sur la zone endommagée à l'aide de rivets. Ceci est impossible avec les composites. En effet, nous avons vu à la Section 2.3 que le rivetage est incompatible avec ce type de structures. C'est pourquoi, il a fallu trouver d'autres méthodes pour assurer la maintenance et réparabilité de ces matériaux.

L'une des procédures courantes de réparation des structures composites est l'utilisation de patch composites que l'on vient placer sur la zone endommagée à l'aide d'adhésifs. Une description de cette méthode est donnée dans [10] pour la réparation du Cessna 350 dont la voilure est intégralement fabriquée en composites :

- La première étape consiste en l'excavation de la zone endommagée. La surface est ensuite nettoyée et poncée, Figure 9a.
- Le patch est découpé et laminé de manière à l'adapter à la zone à réparer. Il est ensuite fixé grâce à l'alternative 3 présentée en Section 2.3.
- Le patch est appliqué sous vide afin de le maintenir en position et chauffé à haute température (100 °C) pour le durcissement de l'adhésif, Figure 9c.



(a) Première étape



(b) Deuxième étape



(c) Troisième étape

FIGURE 9 – Trois étapes de la réparation à l'aide de patch composites issue de [10]

La réparation des composites est ainsi un processus long et coûteux, ce qui peut-être un frein à leur généralisation dans l'industrie aéronautique.

2.5 Renforcement des structures existantes

Les composites ne sont pas seulement utilisés pour la conception de nouveaux avions, mais également pour la maintenance de ceux qui sont vieillissants et dont la structure est métallique. En effet, l'introduction des composites comme renfort extérieur afin de pallier à la fatigue et à la corrosion des matériaux est une technique couramment utilisée [11]. La réparation par patch présentée à la Section précédente est ainsi utilisée comme un moyen de maintenance préventive des avions. En effet, le patch composite, appliqué sur des structures métalliques, permet de rigidifier la structure et retarder ainsi la propagation de fissures ce qui permet de prolonger la durée de vie de l'avion. La RAAF (Royal Australian Air Force) a utilisé cette méthode afin de réparer sa flotte. D'après [3], [2], elle aurait effectuée plus de 180 réparations sur Mirage III liées à des fissures sur l'accès au réservoir.

3 Recyclage des composites

Les composites sont donc des matériaux récents qui tendent à se généraliser dans le domaine de l'aéronautique, en raison de leurs diverses propriétés, que ce soit mécanique, thermique, ...

Cependant, cet accroissement d'utilisation peut soulever des défis en matière de recyclage. Dans un secteur où la durabilité et la réduction de l'empreinte carbone deviennent des priorités, le recyclage des composites aéronautiques représente un enjeu primordial. Plusieurs procédés sont actuellement déjà mis en place, d'autres en phase développement, tous visant à la revalorisation des matériaux composites.

En plus d'avoir un intérêt environnemental, le recyclage des composites peut également avoir un intérêt financier. En effet, les fibres sont coûteuses et les recycler permettrait aux entreprises de pouvoir les réutiliser.

3.1 Procédé thermique

Le procédé thermique le plus déployé actuellement est l'incinération. Cependant ce procédé ne permet pas la récupération ou la revalorisation des matériaux composites mais permet une limitation des déchets permettant la réduction des déchets de 90%. Il existe d'autres méthodes comme la pyrolyse consistant à éliminer la matrice par un procédé

thermique permettant de récupérer les fibres. Cependant ce procédé à l'inconvénient de déposer un résidu de carbone sur ces fibres mais permet de conserver les propriétés mécaniques du matériau.

3.2 Procédé mécanique

Le procédé mécanique consiste en un broyage des déchets visant la récupération d'un broyat (mélange de fibres et de résines) et permettant une séparation approximative de la résine et des fibres. Cette séparation permet une revalorisation du composites. Cependant, les fibres perdent leurs propriétés mécaniques et donc perdent de leur intérêt. C'est pourquoi ce broyat est le plus souvent intégré dans d'autres matériaux composites ou les contraintes mécaniques sont moins importantes comme les matériaux de construction (Béton, Ciment).

3.3 Procédé chimique

Les procédés chimiques consistent en la dépolymérisation des polymères composant le composite. Ces procédés sont déjà utilisés sur des polymères thermoplastiques et en cours de développement sur les polymères thermodurcissables. En effet, le processus de création des matériaux thermodurcis implique un processus irréversible, ce qui rend la dépolymérisation plus complexe. C'est pourquoi, la plupart de ces procédés sont toujours en cours de développement. La solvolysé (utilisant des solvants pour dépolymériser les matrices thermodurcis) est l'un des procédés chimiques en cours de développement. Ces procédés permettraient une revalorisation complète du composite (matrice + fibre).

Procédés	Avantages	Inconvénients
Incinération (Procédé maîtrisé)	Réduction des déchets Récupération d'énergie	Émission de gaz toxique
Mécanique (Procédé maîtrisé)	Récupération des broyats Absence d'utilisation de matériaux dangereux	Dégradation des propriétés mécaniques Possibilité limitée de réutilisation (cimenterie, béton) Énergivore
Pyrolyse (depuis récemment au stade industriel)	Préservation des propriétés mécaniques Récupération des matières premières	Dépôt sur la surface des fibres
Vapothermolyse (en cours de développement industriel)	Absence de dépôt sur la surface des fibres	Propriétés mécaniques sensibles
Solvolyse (en cours de développement au stade labo [6])	Préservation des propriétés mécaniques des fibres Valorisation matière à partir de la résine	Impact environnemental selon le solvant Contrainte de mise en oeuvre (pression)

TABLE 1 – Comparatif des procédés

4 Risques pour la santé et la sécurité au travail

4.1 Santé

L'utilisation de matériaux composites dans la fabrication et la maintenance présente plusieurs risques pour la santé des opérateurs. Premièrement, la manipulation des résines époxy, largement utilisées dans les composites, peut causer des dermatites de contact et des réactions allergiques suite à une exposition prolongée. Ces résines contiennent souvent des composés organiques volatils et d'autres substances chimiques potentiellement nocives. De plus, les fibres de renforcement comme le carbone ou le verre, lorsqu'elles sont coupées ou poncées, libèrent des particules fines qui peuvent être inhalées par les travailleurs, entraînant des problèmes respiratoires tels que la pneumoconiose.

L'exposition prolongée à ces fibres peut également augmenter le risque de développer des maladies plus graves comme la silicose ou même le cancer, en particulier lorsque les recommandations en matière de protection individuelle ne sont pas suivies. La manipulation de ces matériaux nécessite donc des EPI, tels que des masques respiratoires et des gants, et une formation adéquate sur les risques et les procédures de sécurité. Les employeurs doivent aussi mettre en place des systèmes de ventilation adéquats pour réduire la concentration de particules nocives dans l'air, en conjonction avec un système de filtrage pour éviter de rejeter des particules nocives [13].

La mise en place d'une surveillance régulière de la santé des travailleurs exposés aux composites, conjuguée avec des mesures préventives et de suivi sont cruciales pour minimiser les risques pour la santé des opérateurs dans l'industrie des matériaux composites.

4.2 Sécurité

L'utilisation de matériaux composites ne permet évidemment pas de passer outre l'emploi de mesures de sûreté liées aux infrastructures. Les hangars de stockage des avions doivent être conçus pour résister aux conditions météorologiques extrêmes et aux catastrophes naturelles, avec des structures renforcées et des matériaux de construction résistants au feu. Ils doivent également être équipés de systèmes de suppression d'incendies adaptés, tels que des sprinklers automatiques et des extincteurs facilement accessibles, pour répondre rapidement en cas d'urgence. Les équipes d'intervention d'urgence locales doivent être également être formées aux situations d'urgence impliquant des matériaux composites et être équipées des matériels adéquats en conséquence.

La sécurité des avions nécessite des systèmes de surveillance vidéo et des contrôles d'accès sécurisés pour prévenir les intrusions et les activités criminelles. L'éclairage doit être adéquat pour les opérations de maintenance et de réparation qui se déroulent souvent la nuit ou dans des conditions de faible luminosité. De plus, les sols des hangars doivent être conçus pour supporter le poids des avions tout en permettant un drainage efficace des liquides, évitant ainsi les glissades et les chutes. Toutes ces mesures de contingences permettent d'assurer une plus grande sécurité pour les opérateurs, quelque soit la technologie considérée d'ailleurs.

En outre, des espaces dédiés et sécurisés pour le stockage des outils et des matériaux dangereux sont nécessaires pour éviter les risques d'accidents. La formation continue du personnel sur les protocoles de sécurité et les procédures d'urgence est indispensable pour maintenir un environnement de travail sûr. Toutes ces infrastructures doivent être régulièrement inspectées et entretenues pour assurer leur efficacité continue et la sécurité de

tous les opérateurs et équipements aéronautiques [13].

5 Limites des matériaux composites

Les matériaux composites offrent des avantages significatifs en termes de poids, de résistance et de durabilité, mais ils sont confrontés à plusieurs limites. Tout d’abord, le coût de production demeure souvent supérieur à celui de leurs équivalents métalliques, ce qui peut dissuader leur adoption à grande échelle dans certaines industries. De plus, l’adoption de nouveaux matériaux composites nécessite l’établissement de nouveaux cahiers des charges, un processus long et rigoureux comprenant des tests de validation approfondis pour assurer leur conformité aux normes de qualité et de sécurité. La question de l’approvisionnement en matériaux constitue également un défi majeur, car certains composants peuvent être rares ou difficiles à obtenir, à l’image du carbone, d’autant que le développement de la technologie tend à faire croître la demande. En outre, les alternatives telles que les polymères thermoplastiques présentent des difficultés supplémentaires, avec une fabrication souvent plus compliquée et des processus nécessitant une expertise spécialisée. Malgré ces obstacles, le développement continu de nouvelles résines et l’amélioration des techniques de fabrication sont essentiels pour surmonter ces limites et exploiter pleinement le potentiel des matériaux composites dans diverses applications.

6 Conclusion

Les matériaux composites sont donc de plus en plus présents dans les applications industrielles de l’aéronautique, en particulier grâce aux propriétés qui les caractérisent. Le développement de la chimie tient ainsi un rôle très important dans l’évolution des procédés aéronautique. La généralisation des procédés propres aux matériaux composites permet également l’essor des technologies qui leur sont associées et une intégration réglementée au sein des processus industriels. Enfin, la prise en compte des risques accrus pour la santé et la sécurité associés à la fabrication et la manipulation de ces matériaux est essentielle à leur mise en place concrète dans l’industrie aéronautique.

Bibliographie

- [1] AIRBUS. *25 years of carbon fiber production at Airbus Illescas Plant*. Oct. 2015. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=JkFAkoCrmT0>.
- [2] Jason B AVRAM. "Fatigue response of thin stiffened aluminum cracked panels repaired with bonded composite patches". In : (2001).
- [3] A BAKER et al. *Bonded repair of aircraft structures*. T. 7. Springer Science & Business Media, 1988.
- [4] Radoslaw BIELAWSKI. "Composite materials in military aviation and selected problems with implementation". In : *Review of the Air Force Academy* 1 (2017), p. 11.
- [5] BOSSARD. *Solution de fixation pour les composites*. 2020.
- [6] Chayma CHAABANI. "Composites à fibres de carbone : récupération des fibres par solvolysse hydrothermale. Impact sur la qualité des fibres et valorisation de la phase liquide". Ph.D. dissertation. Albi : Mines d'Albi, 2018.
- [7] Justine DELOZANNE. "Durabilité des époxy ; application au collage structural aéronautique". Thèse de doct. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, 2018.
- [8] Philip E IRVING et Costas SOUTIS. *Polymer composites in the aerospace industry*. Woodhead Publishing, 2019.
- [9] Shivi KESARWANI et al. "Polymer composites in aviation sector". In : *Int. J. Eng. Res* 6.10 (2017).
- [10] Larry L MANSBERGER. "General Aviation Composite Repair". In : *Department of Mechanical and* (2009).
- [11] Jean-Denis MATHIAS. "Etude du comportement mécanique de patchs composites utilisés pour le renforcement de structures métalliques aéronautiques". Thèse de doct. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2005.
- [12] A MCILHAGGER, E ARCHER et R MCILHAGGER. "Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications". In : *Polymer composites in the aerospace industry*. Elsevier, 2020, p. 59-81.
- [13] OSHA. *OSHA/29 CFR 1910.94*. 2011.
- [14] Krzysztof PUCHAŁA, Elżbieta SZYMCHYK et Jerzy JACHIMOWICZ. "About mechanical joints design in metal-composite structure". In : *Journal of KONES* 19 (2012), p. 381-390.
- [15] Nathalie VIDAL. *Daher Déroule son plan stratégique et se renforce sur les pièces de structure en thermoplastique avec l'acquisition de Kve Composites*. Jan. 2021. URL : <https://www.daher.com/acquisition-de-kve-composites/>.
- [16] Peng Hao WANG et Natalie ZIMMERMANN. "Maintenance of composite-based aircraft components and structures through the perspective of aviation maintenance technicians in the United States". In : *The Collegiate Aviation Review International* 39.2 (2021).