

Lengsfeld, Wolff-Fabris, Krämer, Lacalle, Altstädt
Technologie composite

Hauke Lengsfeld
Felipe Wolff-Fabris
Johannes Kramer
Javier Lacalle
Volker Altstadt

Technologie composite

Fabrication de préimprégnés et de pièces monolithiques

Les technologies

Les auteurs:

Hauke Lengsfeld, Hexcel Composites GmbH, Stade, Allemagne

Felipe Wolff-Fabris, SKZ – Das Kunststoff-Zentrum/Europäisches Zentrum für Dispersionstechnologie (EZD),
Selb, Allemagne

Johannes Krämer, BASF SE, Ludwigshafen, Allemagne

Javier Lacalle, MTorres Deutschland GmbH, Stade, Allemagne

Volker Altstadt, Université de Bayreuth, Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe, Bayreuth, Allemagne

Distribué dans les Amériques par :

Publications Hanser

6915 Valley Avenue, Cincinnati, Ohio 45244-3029, États-Unis

Télécopieur : (513) 527-8801

Téléphone : (513) 527-8977

www.hanserpublications.com

Distribué dans tous les autres pays par :

Éditions Carl Hanser

Postfach 86 04 20, 81631 Munich, Allemagne

Fax : +49 (89) 98 48 09

www.hanser-fachbuch.de

L'utilisation de noms descriptifs généraux, de marques de commerce, etc., dans cette publication, même si les premiers ne sont pas spécialement identifiés, ne doit pas être considérée comme un signe que ces noms, au sens de la Loi sur les marques de commerce et de marchandises, peut donc être utilisé librement par quiconque. Bien que les conseils et les informations contenus dans ce livre soient considérés comme véridiques et exacts à la date de mise sous presse, ni les auteurs, ni les éditeurs, ni l'éditeur ne peuvent accepter aucune responsabilité légale pour les erreurs ou omissions qui pourraient être commises. L'éditeur n'offre aucune garantie, expresse ou implicite, concernant le matériel contenu dans le présent document.

La détermination finale de l'adéquation de toute information à l'usage envisagé pour une application donnée reste de la seule responsabilité de l'utilisateur.

Les données de catalogage avant publication sont conservées à la Bibliothèque du Congrès

Tous droits réservés. Aucune partie de ce livre ne peut être reproduite ou transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique ou mécanique, y compris la photocopie ou par tout système de stockage et de récupération d'informations, sans l'autorisation écrite de l'éditeur.

© Carl Hanser Verlag, Munich 2016

Editeur : Mark Smith

Direction de la production : Jörg Strohbach

Concept de couverture : Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Conception de la couverture : Stephan Rönigk

Composition : Kösel Media, Krugzell

Imprimé et relié par Hubert & Co GmbH, Göttingen, Allemagne

ISBN : 978-1-56990-599-9

Livre électronique ISBN : 978-1-56990-600-2

Préface

Les préimprégnés ont des prédécesseurs célèbres, comme le contreplaqué trouvé en 3400 avant JC dans l'ancienne Mésopotamie. Les Mésopotamiens se sont rendu compte que coller le bois sous différents angles conférait au bois naturel de meilleures propriétés. De plus, le papyrus, un des premiers types de papier fabriqué à partir de la tige de la plante papyrus, possède un renfort visible, fibreux et unidirectionnel et était utilisé dans l'Égypte ancienne (2 500 avant JC) comme surface d'écriture.

Bien que déclarés obsolètes depuis longtemps, les préimprégnés ont gagné en popularité dans tous les segments de l'industrie des composites en raison de leur polyvalence, de leur teneur élevée en fibres et de leur grande variété de combinaisons fibres-matrice.

Depuis le début des années 1970 jusqu'à aujourd'hui, les composants structurels en fibre de carbone/plastique ont été fabriqués à l'aide de la technologie préimprégnée. Les auteurs ont donc estimé qu'il était temps de fournir un aperçu actuel des tendances et des perspectives liées à cette technologie.

Les préimprégnés therm durcissables sont fabriqués en imprégnant des fibres ou des textiles de renforcement avec des systèmes de résine pré catalysés formulés sur mesure. Les machines et la technologie utilisées pour cette imprégnation facilitent un contact étroit entre la fibre et la matrice et une adhésivité définie de la surface des rubans fabriqués. Ces prégrégs sont utilisés pour fabriquer des composants composites plus rapidement et avec moins de perte de performances que ce qui peut être obtenu avec des technologies d'imprégnation humide similaires. Recouverts de papier support souple, les préimprégnés sont faciles à manipuler et restent flexibles pendant un certain temps à température ambiante.

Au niveau mondial, le marché des préimprégnés a augmenté de 10 % depuis 2012 ; en fait, sa taille a doublé entre 2002 et 2007 (voir le marché mondial des préimprégnés de Lucintel 2008-2013 : tendances, prévisions et analyse des opportunités). Bien que les coûts opérationnels de fabrication des préimprégnés soient souvent plus élevés que ceux des matériaux traditionnels, leur utilisation peut offrir des avantages de coût significatifs si l'on considère leurs propriétés spécifiques au poids.

Cet ouvrage couvre les avancées importantes réalisées en recherche et développement, tant dans les laboratoires académiques qu'industriels. Il identifie les relations fondamentales entre la structure des matériaux, leur traitement et leurs propriétés. Pour l'avenir, le livre présente des développements significatifs de la technologie moderne des préimprégnés.

Après une introduction générale au monde des matériaux renforcés de fibres (Chapitre 1), les composants fondamentaux des préimprégnés sont introduits dans le Chapitre 2. Les deux chapitres suivants décrivent comment les matériaux préimprégnés sont produits puis utilisés pour fabriquer des préformes (Chapitres 3 et 4). Les chapitres 5 et 6 expliquent comment ces préformes sont transformées en composants finaux à l'aide d'autoclaves, de fours ou de la technologie Quickstep. Ils illustrent également les technologies des outils de durcissement respectifs.

Les composants durcis sont ensuite testés puis généralement assemblés pour former des structures complexes. Les chapitres 7 et 8 mettent en évidence les caractéristiques spécifiques à prendre en compte lors de l'utilisation de technologies préimprégnées.

Le livre vise à fournir à l'expert un aperçu complet et orienté vers l'application qui non seulement présente clairement l'état actuel de la technologie, mais illustre également son évolution historique.

Bayreuth, juillet 2015

Volker Altstädt

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous ceux qui ont facilité la publication de ce livre.

Merci à Carl Hanser Publishers qui a soutenu la publication de ce livre, en particulier à Mme Ulrike Wittmann pour la conception et la mise en forme des chapitres.

Merci à Hans Marquardt et Dr Wolfgang Nemetz, Airbus Operations GmbH, Dr Hilmar Apmann, Premium Aerotec GmbH, et Michaela Kersch et Thomas Neumeyer, Université de Bayreuth pour leurs suggestions techniques, discussions et illustrations ainsi qu'à Mike Turner pour son contribution à l'histoire du développement des préimprégnés au Royaume-Uni.

Des remerciements particuliers vont à MTorres et Hexcel Composites, les sociétés qui ont fourni la majeure partie des illustrations.

Merci également à nos familles pour leur patience et leur soutien.

Contenu

Préface	V
Remerciements	VII
Contenu	IX
Abréviations et termes importants	XIII
1. Introduction	1
Felipe Wolff-Fabris	
1.1 Matériaux	1
1.2 Plastiques renforcés de fibres continues	4
1.2.1 Profil de propriété	4
1.2.2 Fabrication	6
1.2.3 Demandes	8
1.3 Références	9
2 Préimprégnés et leurs précurseurs	11
Felipe Wolff-Fabris, Hauke Lengsfeld et Johannes Krämer	
2.1 Structure et préparation	13
2.2 Systèmes matriciels	15
2.3 Fibres et textiles	18
2.4 Systèmes préimprégnés	20
2.5 Références	25
2.6 Informations supplémentaires	25

3 Technologie préimprégné 27

Hauke Lengsfeld et Mike Turner

3.1 Contexte historique	27
3.2 Introduction : méthodes de fabrication	29
3.2.1 Conception d'une ligne de production de préimprégnés	31
3.2.2 Méthodes de fabrication des préimprégnés	31
3.2.2.1 Procédés de thermofusible	31
3.2.2.2 Méthode de revêtement dans un solvant/immersion dans un solvant	36
3.2.3 Variations des préimprégnés	38
3.2.3.1 Bande fendue	38
3.2.3.2 Éléments de remorquage	39
3.2.4 Effet des paramètres de fabrication	39
3.2.4.1 Contenu en résine	40
3.2.4.2 Niveau d'imprégnation	41
3.2.4.3 Adhérence (adhésivité)	43
3.3 Références	45

4 Préimprégnés : Technologie de traitement 47

Hauke Lengsfeld et Javier Lacalle

4.1 Présentation	47
4.2 Découpe des préimprégnés	50
4.2.1 Découpe manuelle	50
4.2.2 Découpe automatisée	51
4.3 Stratification manuelle des préimprégnés	55
4.4 Systèmes de pose automatisés : pose automatisée de bandes (ATL) et Placement automatisé des fibres (AFP)	57
4.4.1 Présentation	57
4.4.1.1 Objectif des processus de dépôt automatisés	59
4.4.1.2 Principales étapes du processus des technologies de superposition automatisée	60
4.4.1.3 Préimprégnés pour les processus de superposition automatisés	64
4.4.1.4 Architecture des machines	68
4.4.2 Pose automatique de bande (ATL)	72
4.4.2.1 Introduction	72
4.4.2.2 Matériaux préimprégnés pour ATL	72
4.4.2.3 Principe général des processus ATL	74
4.4.2.4 Technologie ATL et principaux sous-systèmes	76
4.4.2.5 Sélection de la configuration de la machine pour les processus ATL ...	78
4.4.3 Placement automatique des fibres (AFP)	83
4.4.3.1 Introduction	83

4.4.3.2 Matériaux préimprégnés pour	84
AFP 4.4.3.3 Principe directeur des processus AFP	85
Technologie AFP et sous-systèmes concernés	87
4.4.4 Productivité et rentabilité des processus de désarmement	95
4.4.4.1 Productivité du stockage	95
4.4.4.2 Rentabilité des processus automatisés de stockage	98
4.5 Pultrusion	100
4.6 Formation de drapé à chaud	104
4.7 Processus de moulage par transfert de résine de même qualité (SQRTM)	111
4.8 Références	113
4.9 Informations supplémentaires	113
5 Technologies de durcissement	115
5.1 Principes fondamentaux du cycle de durcissement	115
5.2 Durcissement en autoclave	119
5.3 Durcissement au four	122
5.4 Technologie QuickstepTM	123
5.5 Processus de moulage/formage sous presse	125
5.6 Processus d'induction	126
5.7 Durcissement par micro-ondes	127
5.8 Durcissement par faisceau d'électrons	130
5.9 Références	134
6 Technologie d'outillage	135
6.1 Exigences	136
6.2 Matériaux d'outillage	138
6.2.1 Métaux	139
6.2.2 Matériaux composites à fibres GFRP/CFRP	141
6.2.3 Autres matériaux	145
6.3 Fabrication d'outils	146
6.3.1 Fabrication directe d'outils de formage	147
6.3.2 Fabrication indirecte d'outils de formage	148
6.4 Concepts et exemples d'outillage	151
6.4.1 Outils de formage à chaud	151
6.4.2 Moules de durcissement	153

6.4.2.1 Outils de durcissement à moule ouvert	162
157 6.4.2.2 Outils de durcissement en moule fermé	157
158 6.4.3 Agents de démoulage et nettoyage	158
6.5 Informations complémentaires	159
7 Test des préimprégnés	161 Johannes Kramer
7.1 Caractérisation du préimprégné non durci	162
7.1.1 Poids surfacique du préimprégné, teneur en résine et poids surfacique des fibres	162
7.1.2 Flux de résine	162
7.1.3 Virement de bord	164
7.1.4 Drapabilité	165
7.1.5 Volatils	165
7.1.6 Viscosité	166
7.1.7 Test de récupération d'eau (Test WPU)	168
7.1.8 Test des bords coupés en microscopie	168
7.2 Caractérisation du préimprégné durci	169
7.2.1 Teneur en volume de fibres	169
7.2.2 Détermination de la température de transition vitreuse	171
7.2.3 Épaisseur du pli durci (CPT)	172
7.3 Références	173
8 Conception et réalisation	175 Hauke Lengsfeld
8.1 Concepts de conception	175
8.1.1 Conception positive/négative	175
8.1.2 Conception intégrale/différentielle	177
8.1.3 Concepts de moule ouvert	180
8.2 Facteurs déterminants et interactions	185
8.2.1 Facteurs déterminants lors de la fabrication des composants	185
8.2.2 Interrelations lors de la fabrication des composants	187
8.3 Références	196
Conclusion	197
Les auteurs	199
Index	201

Abréviations et Conditions importantes

Activation	Chauffage d'un préimprégné pour augmenter le collant
AFP	Placement automatisé des fibres
ALV	Vitesse moyenne de drapage
ATL	Pose de ruban automatisée
BMC	Composé de moulage en vrac
IMC	Bismaléimide
BOÎTE	Benzoxazine
GOUJAT	Conception assistée par ordinateur
CAME	Fabrication assistée par ordinateur
PCM	Tapis à filament continu
CFRP	Plastique renforcé de fibre de carbone
CNC	Commande numérique informatisée
CPT	Épaisseur du pli durci
CSM	Tapis à brins coupés
CTE	Coefficient de dilatation thermique
DD	Double diaphragme
DDS	Diaminodiphénylsulfone
DFP	Placement des fibres sèches
DGEBA	Éther diglycidique du bisphénol A
DICY	Dicyandiamide
DSC	Calorimétrie différentielle à balayage
PE	Époxy
FAW	Poids aérien des fibres
FRC	Composite renforcé de fibres
PRF	Plastiques renforcés de fibres
CVF	Teneur en volume de fibres
FW	Enroulement filamenteux
PRV	Plastique renforcé de fibres de verre
HLU	Lay-up des mains
HM	Haut module

IHM	Interface Homme-machine
HS	Haute résistance
Fibre HT	Fibre haute résistance
MI	Module intermédiaire
Fibre IM	Fibre à module intermédiaire
Mise en place	Dépôt séquentiel de produits semi-finis plats en couches individuelles
FCN	Tissu non frisé
MOI itinérant	Roving multi-extrémités
NC	Commande numérique
NGT	Outils nickel-galvano
OoA	Hors autoclave
Chevauchement/Espace	Chevauchement/espace entre deux bandes parallèles
PAM	Polyamide
PATTE	Poids aérien préimprégné
PE	Polyéthylène
COUP D'OEIL	Polyéther éther cétone
I.P.E.	Polyéther imide
PSE	Polyéther sulfone
API	Programmable Logic Controller
Livre de plis	Décrit la séquence des plis individuels dans une pièce
PP	Polypropylène
Préimprégné	Fibres préimprégnées
Câble préimprégné	Ruban préimprégné étroit
RC	Teneur en résine
RF	Flux de résine
RTM	Moulage par transfert de résine
Diaphragme	Diaphragme unique
SE itinérant	mèche à une extrémité
Bande fendue	Ruban étroit unidirectionnel (préimprégné) découpé à partir d'un ruban de fibres plus large
SMC	Composé de moulage en feuille
SQRTM	Même moulage par transfert de résine qualifié
Empilage	Définir l'orientation et la séquence des fibres
Échelonnement	Distance relative entre les bandes dans deux couches/plis avec la même orientation
Mise en scène	Degré de réticulation (a)
Pilotage	Drapage dans l'avion
TCP	Point central de l'outil
TGDDM	Abréviation alternative pour TGMDA
TGMDA	N,N,N',N'-tétraglycidyl-4,4'-diaminodiphénylméthane
Remorquage	Faisceau de filaments en fibre de carbone
DU	Unidirectionnel

EN 14917	Résines polyester insaturées
Contenu volatil	Contenu volatil
WPU	Récupération d'eau
WR	mèche tissée

1

Introduction

Felipe Wolff-Fabris

1.1 Matériaux

La découverte et le développement de nouveaux matériaux ont toujours eu un impact sociétal, économique et militaire sur l'humanité. Des figurines en argile ont été cuites dès l'âge mésolithique, environ. 40 000 à 8 500 avant JC. Les métaux ont également une longue histoire.

L'âge du cuivre englobe la période allant du néolithique jusqu'à l'époque de la fabrication des outils et des ornements (5 000 à 3 000 avant JC). À cette époque, l'agriculture s'installe et l'humanité fait ses premiers pas dans les arts. Les périodes postérieures à l'âge du cuivre sont également identifiées par les métaux : l'âge du bronze, du nom d'un alliage découvert par hasard, s'étend de 3 000 à 1 000 avant JC, et l'âge du fer de 1 000 avant JC aux temps modernes. La fabrication et la transformation des matériaux ont permis de faire progresser l'imagination intrinsèque de l'humanité. Il était possible de transférer des idées dans le monde physique et tangible.

Les 150 dernières années ont été marquées par une croissance démographique sans précédent et un développement technologique époustouflant jamais vu auparavant dans l'histoire de l'humanité. La révolution industrielle, c'est-à-dire. c'est-à-dire l'adoption à grande échelle de machines de fabrication, a été un contributeur majeur à ce développement. La recherche et le développement ont donné naissance à de nouveaux matériaux qui font désormais partie intégrante de notre vie quotidienne. Un exemple est l'utilisation de nouveaux alliages d'aluminium qui permettent de fabriquer des avions plus légers, plus grands et plus performants. De plus, la résistance thermique extrêmement élevée des céramiques techniques (jusqu'à 3 000 °C) a facilité l'exploration spatiale.

Les matières plastiques naturelles, comme le caoutchouc naturel et l'ambre, sont connues depuis des siècles. En 1905, Leo Hendrik Baekeland a développé un procédé qui utilisait la pression et la température pour initier une réaction chimique entre deux liquides (phénol et formaldéhyde), créant ainsi un matériau solide. La résine phénolique obtenue, disponible dans le commerce quelques années plus tard sous le nom de Bakélite, était utilisée pour les boîtiers de téléphones. Cependant, de nombreux matériaux synthétiques appartenant à cette dernière classe de matériaux n'ont été développés qu'au cours des dernières décennies.

Par rapport aux métaux et à la céramique, le façonnage des matières plastiques nécessite beaucoup moins d'énergie. Les plastiques présentent également des densités considérablement inférieures. En raison de ces avantages, les matériaux plastiques ont remplacé les métaux et la céramique dans de nombreuses applications et facilitent désormais la fabrication de produits totalement nouveaux. Là encore, l'humanité dispose d'un nouvel outil pour transférer ses idées les plus ingénieuses dans le monde physique. De la communication sans fil aux voitures sans conducteur, notre créativité n'a pas de limites. Les futurs historiens pourraient regarder en arrière et affirmer : L'ère du plastique a commencé vers 2000 après JC.

Le tableau 1.1 présente une comparaison générale des avantages et des inconvénients des métaux, des céramiques et des matières plastiques. Les données sur la production mondiale soulignent le rôle immense des matières plastiques.

Tableau 1.1 Propriétés générales des métaux, céramiques et plastiques

Avantages matériels		Les inconvénients	Production mondiale estimée en 2012 [1–5]
Les métaux	Haute ténacité	Haute densité	1 615 Mt/217 millions de m3a
	Rigidité et résistance élevées		
Céramique	Excellente résistance à la température	Faible ténacité	200 Mt/76 millions de m3b
	Haute rigidité		
Plastiques	Faible densité	Mauvaise résistance à la température	288 Mt/288 millions de m3c
	Facile à traiter		

a : Acier brut, aluminium, cuivre et titane.

b : Verre, porcelaine et céramique technique

c : Hypothèse : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Au niveau moléculaire, les matériaux plastiques sont constitués de composants chimiques répétitifs ; ils sont donc également appelés polymères. Le polymère grec signifie « plusieurs parties » (poly : plusieurs, meros : parties). Selon leur structure chimique, les polymères sont classés en thermoplastiques ou thermodurcissables.

Les matériaux thermoplastiques sont constitués de très longues chaînes moléculaires, formées d'unités répétitives comme mentionné précédemment. Leur comportement semblable à celui d'un solide est dû à l'enchevêtrement de chaînes moléculaires individuelles. Des exemples de cette classe de matériaux comprennent le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le polyéthylène (PE) et le polyamide (PA), entre autres. Les résines phénoliques, ainsi que les résines polyester et époxy, sont des exemples de matériaux thermodurcissables. Les thermodurcissables sont également constitués de chaînes moléculaires ; cependant, ici ces chaînes sont réticulées. Dans les chaînes moléculaires réticulées, les liaisons chimiques maintiennent non seulement les chaînes ensemble, mais elles se forment également entre les chaînes. Une discussion complète sur les thermoplastiques et les thermodurcissables peut être trouvée dans la littérature [6].

Combinaison de matériaux

La combinaison de matériaux existants offre la possibilité de créer de nouveaux matériaux techniques améliorés. Il est également possible de conférer de nouveaux profils de propriétés en utilisant des additifs minéraux ou métalliques. Dans un sens plus large, tous les matériaux constitués de deux ou plusieurs substances peuvent être définis comme des matériaux composites.

Matériaux fibreux, c'est-à-dire c'est-à-dire que les matériaux avec un rapport d'aspect élevé (longueur/diamètre) offrent le potentiel d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques de la phase continue à renforcer (appelée matrice). Les fibres agissent comme un cadre supportant des charges externes. La matrice continue répartit ces charges et maintient les fibres en place. La combinaison de la matrice et des fibres donne lieu à de nouveaux profils de propriétés qui ne peuvent pas être obtenus par les composants individuels. Ou, comme l'aurait dit Aristote il y a plus de 2000 ans : Le tout est plus grand que la somme de ses parties. Il en va de même pour le principe actif d'un matériau renforcé par des fibres.

Le principe de renforcement des matériaux renforcés de fibres est observé depuis longtemps dans la nature. Le bois, l'un des matériaux de construction les plus anciens, présente d'excellentes propriétés spécifiques et est aujourd'hui encore irremplaçable dans de nombreuses applications. Les principaux constituants du bois sont la cellulose, la lignine et le polyose. Les fibrilles de cellulose au sein de la structure cellulaire agissent comme des agents de renforcement ; ils sont maintenus en place par une matrice de lignine. Ici, le polyose sert d'agent de liaison (agent de couplage) entre la cellulose et la lignine.

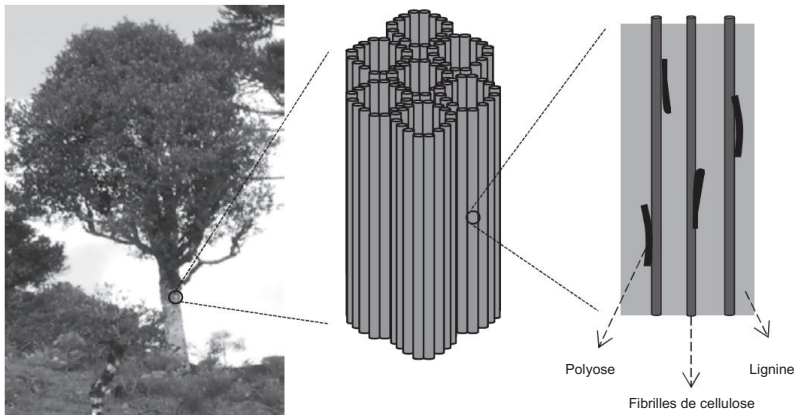


Figure 1.1 Structure schématique du bois

Afin de combiner les avantages des plastiques et de la céramique, les matériaux polymères sont principalement renforcés à l'aide de fibres céramiques (tableau 1.1). Ils comprennent les fibres de verre et de carbone (voir chapitre 2). Ce renfort fibreux offre non seulement des propriétés mécaniques améliorées, mais il augmente également la résistance thermique des matières plastiques et rend ainsi les plastiques adaptés à des domaines d'application élargis.

La longueur et l'orientation des fibres individuelles déterminent les propriétés finales d'un matériau renforcé par des fibres. La figure 1.2 montre schématiquement l'effet de différents types de renfort fibreux sur la résistance du matériau plastique concerné.

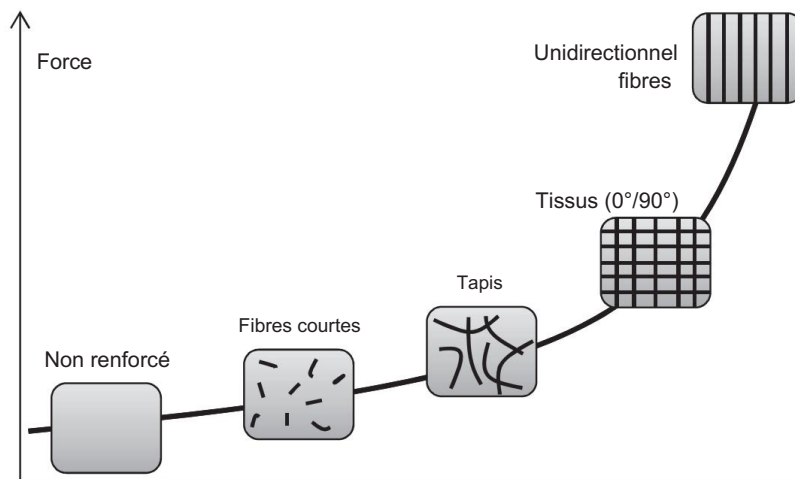


Figure 1.2 Effet du type de renfort sur la résistance des matériaux plastiques

Le marché des matériaux renforcés de fibres est en constante croissance. Elle comprend des pièces automobiles fabriquées à partir de thermoplastiques renforcés de fibres courtes ainsi que des composants hautes performances fabriqués à partir de thermodurcissables renforcés de fibres continues pour l'industrie aéronautique.

1.2 Plastiques renforcés de fibres continues

1.2.1 Profil de propriété

Le type, le contenu, la longueur et l'orientation des fibres déterminent le degré de renforcement d'un matériau plastique. Généralement, on distingue les matières plastiques renforcées de fibres courtes (< 1 mm), longues (de 1 à 50 mm) et de fibres continues. Ces derniers sont des systèmes multi-composants constitués d'une fibre continue à haute résistance (par exemple, fibre de verre ou de carbone) et d'une matrice polymère résistante [7].

Afin de maintenir l'effet de renforcement de la fibre dans le matériau plastique, les exigences suivantes doivent être respectées : la résistance et le module d'Young du matériau fibreux doivent être supérieurs à ceux du polymère matriciel. Cependant, le matériau de la matrice doit présenter un allongement à la rupture plus élevé que la fibre.

Au sein du composite, les fibres absorbent les charges externes, ce qui nécessite une rigidité et une résistance élevées. Pour les applications de construction légère, les fibres doivent également présenter de faibles densités. Le chapitre 2 discutera plus en détail des fibres de renforcement pertinentes et de leurs propriétés.

La matrice doit remplir un certain nombre de tâches importantes : elle permet le moulage du matériau, lie et positionne les fibres de renforcement et transfère les charges d'une fibre à l'autre. Le chapitre 2 présentera également les thermodurcissables pertinents qui peuvent être utilisés comme matériaux de matrice dans les plastiques renforcés de fibres.

Cependant, pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées dans la combinaison matrice et fibres, les exigences ci-dessus ne sont pas suffisantes. De faibles liaisons adhésives entre les deux composants annuleront l'avantage de la résistance des fibres ou du transfert de charge par la matrice. L'adhésion interfaciale de la matrice de fibres est cruciale pour la qualité et les caractéristiques d'utilisation finale des composants en plastique renforcé de fibres.

Étant donné une adhérence suffisante entre la fibre et la matrice, les propriétés mécaniques des matériaux renforcés par des fibres sont principalement déterminées par l'orientation des fibres. En général, les matériaux renforcés de fibres présentent un comportement anisotrope, c'est-à-dire. c'est-à-dire que leurs propriétés mécaniques changent avec l'orientation de la charge. Ils présentent leur résistance et leur rigidité les plus élevées possibles sous des charges de traction parallèles à l'orientation des fibres. Cependant, les charges de traction perpendiculaires à l'orientation des fibres entraînent un faible renforcement de la matrice (rigidité) et la résistance peut même diminuer. La dépendance du comportement mécanique des plastiques renforcés de fibres à l'orientation des fibres est bien documentée dans la littérature [8].

Le comportement anisotrope des plastiques renforcés de fibres représente une différence majeure par rapport à d'autres matériaux courants, tels que l'aluminium et les plastiques non renforcés, et doit être soigneusement pris en compte lors de la conception avec des plastiques renforcés de fibres. Afin de dimensionner correctement un composant renforcé de fibres et d'ajuster l'orientation des fibres, les types de charges et les directions de charge dominants rencontrés lors de l'utilisation du composant doivent être connus (ou au moins estimés). Cela garantit que les composants renforcés de fibres sont conçus de manière appropriée pour résister aux charges rencontrées lors de leur utilisation et que les possibilités et les avantages de cette classe de matériaux sont pleinement exploités. Le chapitre 8 décrira plus en détail une variété de concepts de conception pour la fabrication de composants renforcés de fibres hautes performances.

Les propriétés spécifiques aux matériaux renforcés de fibres ainsi que d'autres matériaux de construction légers couramment utilisés sont présentées dans le tableau 1.2. Les propriétés spécifiques très élevées, c'est-à-dire. c'est-à-dire ceux relatifs aux densités des matériaux, illustrent l'énorme potentiel des matériaux renforcés de fibres pour les applications légères.

Tableau 1.2 Module d'Young (r) et résistance (s/r) spécifiques typiques de matériaux de construction légers sélectionnés

Matériel	Module de Young spécifique (GPa/g cm-3)	Force spécifique (MPa/g cm-3)
Alliage d'aluminium	20-30	150-200
Alliage de titane	20-25	300-400
Époxy renforcé de fibre de verre (unidirectionnel)	20-25	600-800
Époxy renforcé de fibre de verre (quasi-isotrope)	10-12	200-250
Époxy renforcé de fibre de carbone (unidirectionnel) 70-100		12h00-18h00
Époxy renforcé de fibre de carbone (quasi-isotrope) 30-50		250-300

La détermination correcte des propriétés mécaniques des matériaux renforcés par des fibres nécessite un personnel hautement qualifié et expérimenté ainsi qu'un équipement très précis. Par exemple, la préparation des éprouvettes (par exemple par sciage) peut déjà introduire de fines fissures dans les échantillons qui affecteront négativement la résistance à la traction.

Le positionnement exact de l'éprouvette dans la machine d'essai (orientation des fibres et direction de la charge) est également d'une importance cruciale. Les méthodes d'essai pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux renforcés de fibres et une description détaillée de la préparation des échantillons peuvent être trouvées dans la littérature [9].

1.2.2 Fabrication

Les méthodes de fabrication des matériaux renforcés de fibres dépendent largement de la matrice. Les matrices thermoplastiques sont généralement chauffées, fondues et injectées ou pressées dans un moule. Ici, la matrice se solidifie lorsque le composant refroidit dans le moule. La géométrie finale de la pièce est donc déterminée par le moule.

D'autre part, les systèmes de résine (thermodurcissables non durcis) sont des systèmes chimiquement réactifs et sont constitués de composés de faible poids moléculaire. Semblables aux matériaux thermoplastiques, les résines sont placées dans un moule ou une presse. Cependant, la solidification de la matrice ne résulte pas d'un refroidissement (comme pour les thermoplastiques), mais d'une réaction de réticulation (durcissement). Dès qu'une structure tridimensionnelle stable est formée, le composant peut être démoulé. En raison de la réaction chimique nécessaire, le temps de solidification d'un matériau thermodurci renforcé par des fibres est généralement plus long que celui d'un matériau thermoplastique renforcé par des fibres. Par conséquent, les temps de cycle pour les matrices thermodurcies sont généralement plus longs. De plus, la réticulation est un processus irréversible, c'est-à-dire. par exemple, il n'est pas possible de remouler un composant thermodurci une fois qu'il a durci.

Les résines présentent des viscosités nettement inférieures à celles des thermoplastiques fondus. Par conséquent, la fluidité des résines est plus élevée, ce qui permet la fabrication de composants à géométries plus complexes, car des parois plus fines et des trajets d'écoulement plus longs sont plus faciles à mouiller. De plus, les matériaux renforcés de fibres thermodurcies nécessitent moins de production.

pressions de cessation. Certains processus, par ex. par exemple, l'infusion de résine pour la fabrication de pales de rotor pour éoliennes, ne nécessite aucune pression. Au lieu de cela, la résine est aspirée dans le moule par pression négative (vide). La conception des moules et des équipements/usines de traitement pour la fabrication de matériaux renforcés de fibres thermodurcies est également moins complexe, ce qui réduit les coûts d'investissement. Par conséquent, les composants renforcés de fibres continues sont généralement fabriqués avec des matrices thermodurcissables. Les procédés les plus pertinents pour la fabrication de composants thermodurcissables renforcés de fibres continues sont répertoriés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 Comparaison des différentes méthodes de fabrication

Méthode						Divers Exemple d'application	
Main mise en place	3	0	0	0	0	Processus ouvert (dangers pour la santé)	Prototypes et objets exclusifs Piscines
Infusion sous vide	3	0	0	0	1	Convient aux grandes pièces	Pales de rotor pour éoliennes Bateaux
Pultrusion	0	3	3	3	3	Convient uniquement aux profils	Tuyaux, tubes et profilés
Enroulement filamentaire	0	3	3	1	3	Ne convient pas aux géométries complexes	Réservoirs sous pression
RTM	1	2	2-3	2	2	Convient à masse production	Pièces automobiles Pièces pour petits avions
Préimprégné/ Autoclave	2	2	1-2	1	3	Durée de conservation limitée des préimprégnés	Pièces de voitures de course Composants aérospatiaux Correctifs de réparation

0 : faible 1 : moyen 2 : élevé 3 : très élevé

Afin de fabriquer des composants dotés de propriétés spécifiées aux coûts souhaités, il est impératif de considérer simultanément les matériaux, les processus et la conception des composants. Ces trois aspects sont étroitement liés. Par exemple, la conception d'un nouveau composant peut nécessiter une modification du processus de fabrication, ou un ajustement du système de résine et/ou de l'orientation des fibres afin d'obtenir des performances optimales du composant.

1.2.3 Demandes

Les matériaux renforcés de fibres sont utilisés dans diverses applications qui nécessitent des matériaux très légers dotés de propriétés mécaniques particulièrement bonnes. Cela inclut le secteur de l'énergie (éoliennes), l'industrie aéronautique, l'armée et l'industrie automobile [10]. Au cours des dernières années, les matériaux renforcés de fibres, en particulier les plastiques renforcés de fibres de carbone, ont connu un taux de croissance annuel d'env. 13 %, et ils devraient augmenter à un rythme nettement plus élevé d'ici 2020.

Les raisons de cette croissance incluent les préoccupations environnementales croissantes, tant au sein du grand public qu'au sein des instances dirigeantes, ainsi que la volonté de réduire de manière significative la consommation de carburant, en particulier dans les transports et la navigation [11]. La réduction du poids des avions et des voitures/camions offre le plus grand potentiel de réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO2, obligeant ainsi les fabricants à explorer des alternatives de matériaux dotés de meilleures propriétés mécaniques spécifiques. L'utilisation de plastiques renforcés de fibres de carbone (CFRP) peut réduire le poids des composants jusqu'à 70 % par rapport à l'acier, et jusqu'à 30 % par rapport à l'aluminium, en supposant une conception adaptée à la charge [12].

Les composants CFRP sont généralement fabriqués à l'aide de la technologie préimprégnée. Plus de 54 % de la production mondiale de fibres de carbone est utilisée pour la fabrication de pré-imprégnés. Encore env. 5 % sont utilisés comme mèches ou mailles pour les processus d'infiltration tels que le moulage par transfert de résine (RTM). D'autres procédés de fabrication importants pour le CFRP comprennent les procédés de bobinage (environ 15 %) et la pultrusion (environ 8 %) [10].

Environ 95 % des fibres de carbone sont utilisées dans les composants en plastique renforcés de fibres de carbone. Par conséquent, la consommation de fibre de carbone reflète l'engagement dans le domaine des composants renforcés de fibre de carbone dans un pays ou une région donnée. Le tableau 1.4 montre la consommation de fibre de carbone par région et application. Les composants renforcés de fibres de carbone destinés aux applications aéronautiques, automobiles et éoliennes sont principalement produits en Europe, tandis que les composants CFRP produits en série pour les articles de sport sont presque exclusivement produits en Asie.

Tableau 1.4 Consommation de fibres de carbone par marchés et régions [13]

	L'Europe	Amérique du Nord	Asie	Autre
Aéronautique et défense	46 %	33 %	16 %	5 %
Sport et passe-temps	4 %	6 %	89 %	1 %
Générateurs d'énergie éolienne	74 %	15 %	11 %	< 1 %
Voiture	56 %	26 %	18 %	< 1 %

1.3 Références

- [1] USGS. Commission géologique des États-Unis, informations sur les minéraux. (En ligne) Département américain de l'intérieur. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> (consulté le 9 juin 2014).
- [2] ISPY Publishing : Rapport d'intelligence du marché du verre, Bolton : ISPY Publishing, 2013.
- [3] Industrie céramique avancée : matières premières et manufacturées : aperçu 2014. (En ligne) (consulté le 01-02-2014) <http://www.ceramicindustry.com/articles/93677-raw-manufactured-materials-2014-over-view> (consulté le 9 juin 2014).
- [4] Cerame Unie — Association européenne de l'industrie céramique : rapport d'activité. Bruxelles : Cérame Uni, 2013.
- [5] Plastics Europe : Plastics — the Facts 2013, Une analyse des dernières données européennes sur la production, la demande et les déchets de plastiques. Bruxelles : Plastics Europe, Association des fabricants de plastiques, 2013.
- [6] G.W. Ehrenstein. Matériaux polymères — Structure, propriétés, applications. Munich : Hanser Publishers, 2001.
- [7] H. Schürmann. Construction avec Faser-Kunststoff-Verbunden. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg : Springer Éditions, 2007.
- [8] G.W. Ehrenstein. Faserverbund-Kunststoffe — Werkstoffe — Verarbeitung — Eigenschaften. Munich: Éditeurs Hanser, 2006.
- [9] V. Altstädt. Tests de matériaux composites, dans Tests de polymères, W. Grellmann, S. Seidler (Eds.). Munich : Hanser Publishers, 2007, 511-560.
- [10] E. Witten, B. Jahn. Composites-Marktbericht 2013 — Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe/Carbon Composites, 2013.
- [11] C.-S. Ernst, L. Eckstein, I. Olschewski. CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw's bis 2020. Aix-la-Chapelle : Finale rapport 113510, 2012.
- [12] F. Gojny. Fibres de carbone et composites : ascension vers les matériaux d'ingénierie industrielle — Perspectives du marché et applications, dans Carbonfasern : Herstellung — Technische Möglichkeiten — Marktpotenziale. Meitingen : Cluster-Treff Bayern Innovativ, 2011.
- [13] Experts de l'industrie. Fibres de carbone et plastiques renforcés de carbone (CFRP) – Un marché mondial. 2013.

2

Préimprégnés et Leurs précurseurs

Felipe Wolff-Fabris, Hauke Lengsfeld et
Johannes Kramer

Au cours des 70 dernières années, les préimprégnés ont considérablement influencé le développement technologique des composants renforcés de fibres hautes performances. Aujourd'hui, ces matériaux sont répandus dans le monde entier et sont utilisés pour la fabrication de pièces composites dans l'industrie aéronautique, pour les trains à grande vitesse, les voitures, les bateaux et bien d'autres applications. Plus de la moitié de la production mondiale de fibres de carbone est utilisée pour fabriquer des préimprégnés [1].

Pourtant, certains segments de l'industrie découvrent encore les avantages des matériaux composites renforcés de fibres par rapport à ceux des matériaux conventionnels, tels que les métaux. De plus en plus, des combinaisons de métaux et de plastiques renforcés de fibres – appelées hybrides – sont introduites.

Ce chapitre donnera un aperçu de la conception des préimprégnés sur les matériaux généralement utilisés pour leur fabrication. De plus, nous présenterons des exemples des différentes générations de préimprégnés, y compris les systèmes préimprégnés modernes actuels.

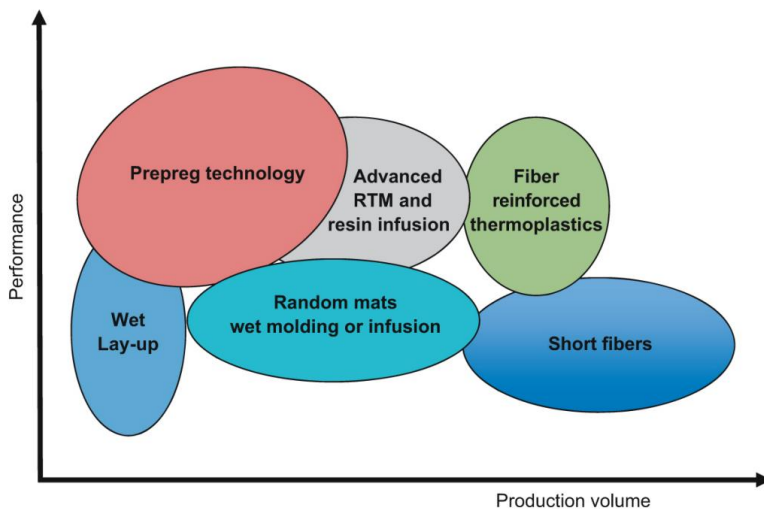


Figure 2.1 Performances et volume de production des préimprégnés par rapport à d'autres technologies

En termes de performances, les préimprégnés revendiquent la position de leader incontestée parmi les matériaux composites hautes performances (Figure 2.1). Cette classe de matériaux permet la fabrication de composants composites ultra-légers mais très résistants. Cependant, le graphique montre également que l'avantage en termes de performances se fait au détriment de la productivité (voir également les chapitres 4 et 5). Cette technologie est donc principalement utilisée pour des séries de production de très petite à moyenne taille. Dans ces scénarios, les performances des composants et les coûts de production peuvent être facilement conciliés en utilisant des matériaux préimprégnés (Figure 2.2). Malgré leur productivité inférieure à celle des techniques d'infusion, les préimprégnés excellent en termes de simplicité et de sécurité de mise en œuvre.

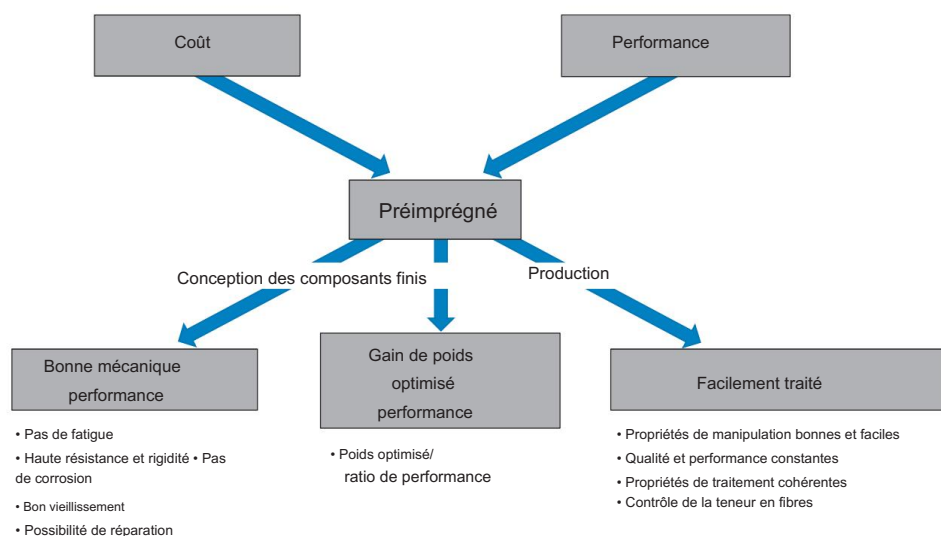


Figure 2.2 Les préimprégnés comme matériaux clés pour les composants hautes performances

Les coûts des matériaux préimprégnés sont déterminés par les exigences auxquelles le composant fini doit répondre. Les coûts des préimprégnés pour la production de composants aéronautiques ne peuvent pas être comparés à ceux des composants pour éoliennes. Cette dernière application est un bon exemple du fait que les coûts de fabrication et de main d'œuvre peuvent être réduits en utilisant des préimprégnés de poids surfacique élevé plutôt qu'en utilisant la technologie d'infusion. L'utilisation de préimprégnés d'un grammage allant jusqu'à 2 000 g/m² permet une efficacité de drapage élevée (même à la main) et une réalisation plus rapide du composant. Alors que la matrice fait déjà partie du préimprégné et doit seulement être durcie, les produits semi-finis secs nécessitent l'étape supplémentaire d'infusion avec la résine matricielle.

2.1 Structure et préparation

Un préimprégné (fibres pré-imprégnées) est un produit semi-fini constitué d'une matrice très visqueuse et de fibres de renfort continues. Le matériau est généralement enroulé sur des rouleaux et se décline en deux variantes :

Préimprégné unidirectionnel (UD) (renforcement fibreux dans une seule direction)

Tissu préimprégné (renfort fibreux orthogonal)

Afin de fabriquer un préimprégné, les fibres sont mouillées avec le matériau de matrice, ce qui donne un produit semi-fini pré-imprégné (voir également le chapitre 3). Le choix du matériau de matrice comprend des systèmes de résines thermodurcissables ainsi que des thermoplastiques ; cependant, les systèmes thermodurcissables sont plus couramment utilisés.

La coupe transversale de la figure 2.3 montre la composition typique d'un préimprégné tel qu'il est livré entre un film de polyéthylène (film PE) et un papier antiadhésif, prêt pour un traitement ultérieur. Certaines techniques de traitement, telles que la pose automatique de bandes (ATL, voir chapitre 4), nécessitent un matériau support uniquement sur une face du préimprégné. Le film PE et le papier antiadhésif protègent le préimprégné de la contamination, empêchent le collage et facilitent la manipulation, par ex. par exemple, pendant la coupe.

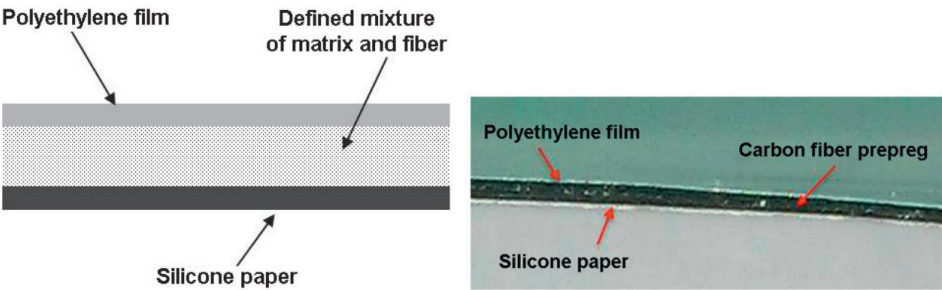


Figure 2.3 Coupe transversale typique d'un préimprégné

Les dimensions du produit semi-fini varient en fonction de l'application et du type de matériau (UD ou préimprégné de tissu). La largeur du rouleau dépend également de la largeur de la ligne de production. Les largeurs et longueurs courantes des rouleaux sont indiquées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Exemples de dimensions de préimprégnés et de poids de rouleaux

	Préimprégné UD	Tissu préimprégné
Largeur en mm	75 à 1500	900 à 1500
Longueur en m	jusqu'à 800	jusqu'à 200
Poids du rouleau en kg	jusqu'à 80	jusqu'à 200

Le rapport entre la teneur en fibres et la matrice est défini avec précision pour chaque préimprégné, avec des tolérances étroites qui dépendent de l'application. Les tolérances pour la teneur nominale en résine (RC) vont de $\pm 2,5\%$ à aussi peu que $\pm 1\%$. Cependant, la teneur en résine peut être ajustée dans certaines limites, en fonction des exigences spécifiques à l'application.

Un choix courant est une combinaison du poids surfacique des fibres et de la teneur en résine qui permet d'obtenir une teneur volumique de fibres d'env. 60 % en poids après durcissement du matériau. Dans de nombreux cas, la résine est perdue lors du durcissement dans les processus sous vide et la teneur en résine du produit semi-fini est donc souvent ajustée à une valeur plus élevée.

En fonction de la teneur en résine du préimprégné et/ou du composant composite, la valeur théorique de l'épaisseur du pli durci (CPT) change. Une perte excessive de résine pendant le processus de durcissement peut également conduire à un CPT inférieur à celui théoriquement calculé. En revanche, si très peu de résine a été perdue lors du traitement sous vide, le CPT peut être supérieur à celui calculé. Le tableau 2.2 montre les poids surfaciques typiques des fibres, les teneurs en résine et les épaisseurs théoriques des plis durcis pour certains types de préimprégnés avec des fibres de carbone. Le tableau pourrait être élargi pour inclure de nombreux autres types de renforts, tels que les fibres de verre et d'aramide.

Tableau 2.2 Exemples de poids surfacique de fibre, de teneur en résine et d'épaisseur de pli durci de préimprégnés

Fibre de type préimprégné	Poids surfacique des fibres (FAW) en g/m ²	Teneur en résine (RC) en % en poids	Épaisseur du pli durci (CPT) en mm	Teneur en volume de fibres (CVF) en % en poids
Norme UD Préimprégné	Fibre de carbone 134	35	0,130	58
	Fibre de carbone 134	40	0,143	52
	Fibre de carbone 268	35	0,260	57
	Fibre de carbone 268	40	0,286	52
Norme de tissu préimprégné	Fibre de carbone 370	35	0,36	57
UD zéro saignement préimprégné	Fibre de carbone 134	34	0,129	58
	Fibre de carbone 268	34	0,258	58

Dans les préimprégnés dits « sans saignement » de 3e et 4e génération, la teneur en résine est si précisément ajustée au poids surfacique de la fibre qu'il n'y a pratiquement aucun écoulement de résine (exsudation de l'excès de résine) pendant le processus de durcissement.

Une autre caractéristique des préimprégnés est leur durée de conservation limitée en raison de leur matrice de résine typiquement réactive. De nombreux préimprégnés doivent être stockés à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ afin de ralentir la réaction de réticulation. Avec un refroidissement approprié, des durées de conservation comprises entre 6 et 18 mois peuvent être atteintes. Dernièrement, des préimprégnés ayant une stabilité de stockage allant jusqu'à 60 jours à température ambiante ont été disponibles dans le commerce pour les applications industrielles générales et automobiles. Les préimprégnés à base de systèmes à matrice thermoplastique ne subissent pas de vieillissement préjudiciable et peuvent être stockés indéfiniment.

2.2 Systèmes matriciels

Les thermoplastiques et les thermodurcissables offrent des systèmes matriciels adaptés aux préimprégnés ; on les appelle communément feuilles organo thermoplastiques. Les préimprégnés thermoplastiques à base de polypropylène (PP) et de polyamide (PA) offrent relativement peu de résistance à la température et sont donc principalement utilisés dans l'industrie automobile. Dans l'aviation, où une résistance à des températures allant jusqu'à 180 °C est généralement requise, des polymères hautes performances tels que le polyéther sulfone (PES) ou le polyéther éther cétone (PEEK) sont généralement utilisés. Par exemple, les composants peuvent être fabriqués industriellement à partir de plastique renforcé de fibres thermoplastiques en utilisant la technologie de forgeage des fibres.

Les préimprégnés thermoplastiques ne subissent pas de réaction chimique ni de réticulation pendant le traitement, car le matériau de la matrice est déjà complètement polymérisé. Grâce à leur stabilité au stockage presque indéfinie et à leurs cycles de fabrication de composants plus courts, les préimprégnés thermoplastiques offrent des avantages par rapport aux préimprégnés thermodurcissables. Un avantage supplémentaire de la matrice thermoplastique est sa très haute résistance aux chocs.

Néanmoins, les préimprégnés thermoplastiques ne sont utilisés que dans quelques applications. Cela peut être attribué à la viscosité élevée présentée par les matériaux thermoplastiques, qui affecte négativement la consolidation et l'élimination de l'air. En conséquence, les composants renforcés de fibres thermoplastiques peuvent présenter une porosité nettement plus élevée et, par conséquent, plus de défauts que les composants fabriqués à partir de préimprégnés thermodurcissables. De plus, les préimprégnés thermodurcissables sont exclusivement traités dans des presses, ce qui permet de réaliser uniquement des géométries de composants simples et petites. Les composants renforcés de fibres continues dans les applications aéronautiques sont donc généralement produits à l'aide de matrices thermodurcissables.

Les thermodurcissables se caractérisent par le fait que leur structure moléculaire finale n'est développée que lors de la fabrication du composant. Ce processus est appelé réticulation, réaction de réticulation ou durcissement. La structure tridimensionnelle en développement peut être influencée par la température et le temps de durcissement ainsi que par le post-durcissement.

Généralement, les thermodurcissables sont polymérisés par la réaction entre au moins deux matériaux de faible poids moléculaire, la résine et l'agent de durcissement. L'augmentation du poids moléculaire créée par la réaction des deux matières premières (réactifs) provoque une augmentation de la viscosité (Figure 2.4). Le profil de propriété final du composant est influencé de manière cruciale par les réactifs utilisés et par les conditions de durcissement (voir également le chapitre 5).

Ce qui suit fournit une brève description des systèmes de résines thermodurcissables les plus importants pour les applications préimprégnés.

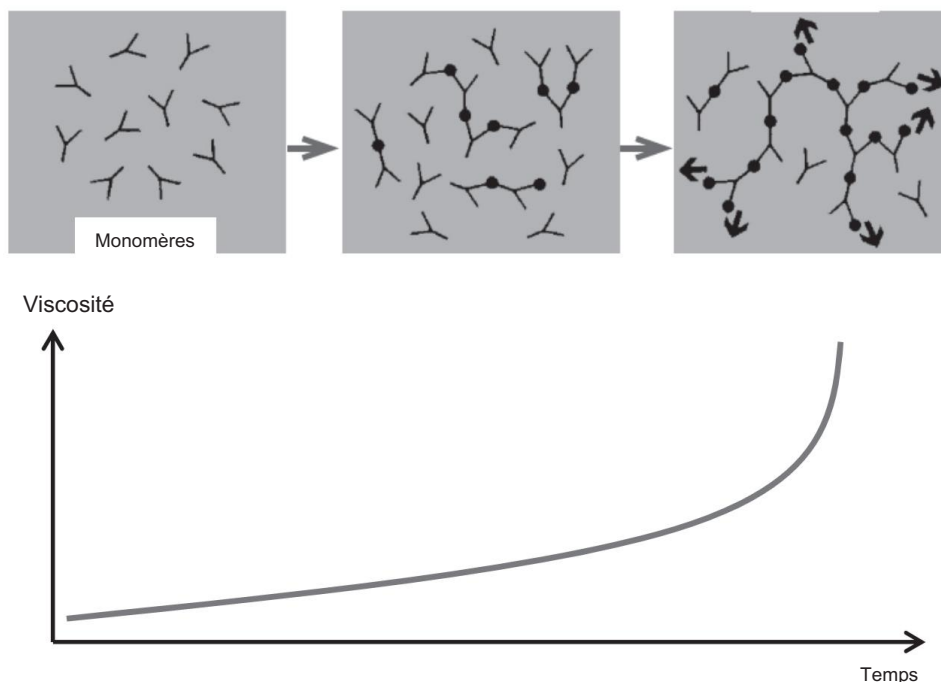


Figure 2.4 Caractéristiques schématiques de durcissement d'un matériau thermodurcissable

Les résines époxy constituent la principale classe de thermodurcissables utilisées pour les préimprégnés. Ils forment des systèmes réticulés par une réaction de polyaddition de monomères avec un groupe époxy et des agents de durcissement appropriés. Les monomères époxy couramment utilisés comprennent le N,N,N',N'-tétraglycidyl-4,4'-diaminodiphénylméthane (TGDDM ou TGMDA), l'éther diglycidyle du bisphénol A (DGEBA) et les novolaques glycidylées (novolaques époxy).

Le degré de réticulation des résines époxy dépend fortement du rapport entre le monomère de résine époxy et l'agent de durcissement. La densité de réticulation maximale est atteinte à un rapport stoechiométrique auquel théoriquement chaque groupe réactif forme un point de réticulation. Cependant, l'état de guérison complète n'est en fait jamais atteint, car le rapport parfait ne peut pas être obtenu métrologiquement. De plus, vers la fin du processus de durcissement, la mobilité réduite de la chaîne entraîne un obstacle stérique, empêchant ainsi l'achèvement de la réaction de durcissement.

Les résines époxy peuvent être réticulées avec une variété d'agents de durcissement ; ici, les amines constituent le groupe le plus couramment utilisé. Généralement, des amines aromatiques, telles que la 4,4'-diaminodiphénylsulfone (4,4'-DDS), le dicyandiamide (DICY) ou des anhydrides sont utilisées comme agents de durcissement pour les préimprégnés. Ces systèmes présentent des durées de conservation relativement longues et sont durcis à haute température (généralement 180 °C) pendant plusieurs heures. L'ajout d'accélérateurs ou la substitution d'amines aromatiques par des amines aliphatiques cycliques facilite le durcissement des préimprégnés à des températures plus basses (par exemple 120 °C). Amines aliphatiques lin

ne conviennent pas comme agents de durcissement pour les résines époxy préimprégnées, car ici la réaction de réticulation commence déjà à température ambiante et n'offrent donc pas la durée de conservation requise.

Les résines bismaléimide (résines BMI) sont réticulées à l'aide d'amines aromatiques ou de thiols et sont généralement durcies à des températures plus élevées que les systèmes de résine époxy. Afin de tirer pleinement parti du profil de propriétés des résines BMI, les composants sont post-durcis à des températures supérieures à 200 °C. Généralement, les résines BMI trouvent des applications lorsque la résistance thermique offerte par les systèmes époxy n'est pas suffisante.

Les résines phénoliques offrent de très bonnes caractéristiques de toxicité feu/fumée (FST) et constituent souvent la matrice de choix pour les composants renforcés de fibres dans les applications intérieures, telles que les revêtements et les garnitures pour les intérieurs d'automobiles, de transports en commun, de wagons et d'aérospatiale. En raison de leur faible ténacité et résistance, les résines phénoliques sont rarement utilisées dans les applications structurales. Ils sont également plus exigeants lors de la transformation car leurs réactions de polymérisation forment des composés volatils. Les composants fabriqués à partir de résines phénoliques présentent donc souvent une porosité plus élevée que ceux fabriqués à partir de préimprégnés de résines époxy ou BMI.

Les résines benzoxazine (résines BOX) représentent la prochaine étape du développement des résines phénoliques. Ces résines ne forment pas de matières volatiles pendant le durcissement, ce qui permet la production de composants de haute qualité. Les propriétés d'inflammabilité des résines BOX sont presque aussi bonnes que celles des résines phénoliques. À température ambiante, il est pratiquement impossible d'initier une réaction de durcissement, ce qui permet des durées de transport et de stockage sûres dépassant 12 mois. Les résines BOX présentent généralement des viscosités plus élevées que les autres thermodurcissables, un fait qui doit être pris en compte lors de la sélection des paramètres de durcissement.

Tableau 2.3 Propriétés et applications de divers systèmes de résine

Matrice	Propriétés	Exemples d'applications
Une résine époxy	Propriétés mécaniques très élevées Traitement facile	Articles de sport, pièces automobiles, pales de rotor pour l'énergie éolienne, pièces de revêtement d'aile et de fuselage pour avions
Résine bismaléimide	Très haute stabilité thermique	Moteurs d'avion
Résine phénolique	Très bonnes propriétés FST	Pièces intérieures pour trains et cabines d'avions
Résine de benzoxazine	Très grande stabilité au stockage Bonnes propriétés FST	Applications potentielles en aérospatiale (pas encore établies)

2.3 Fibres et textiles

Théoriquement, il existe une grande variété de fibres différentes avec des compositions et des propriétés différentes ; cependant, les types les plus couramment utilisés sont les fibres de verre et de carbone. Les préfixes standardisés permettent une classification plus différenciée, par exemple le verre E (électrique) ou la fibre de carbone HM (haut module).

La figure 2.5 montre une comparaison des propriétés des fibres sélectionnées. Les valeurs répertoriées ici sont des valeurs de référence. Nous supposons certaines connaissances générales, par exemple que les fibres plus fines présentent des valeurs de résistance plus élevées que les fibres plus épaisses du même matériau et que la résistance mesurée d'une fibre individuelle augmente avec la diminution de la longueur de serrage.

Le type de fibre le plus couramment utilisé est le verre E. Des valeurs de résistance plus élevées, telles que celles observées dans le verre S (résistance) et le verre R (résistance), peuvent être obtenues en variant la composition.

Les fibres de verre HS (haute résistance) sont des matériaux de renforcement courants dotés de bonnes caractéristiques. Les fibres HM présentent des valeurs de module d'Young plus élevées, tandis que les fibres IM (module intermédiaire) offrent une résistance plus élevée. Les fibres de verre et de carbone sont proposées dans des types spéciaux supplémentaires.

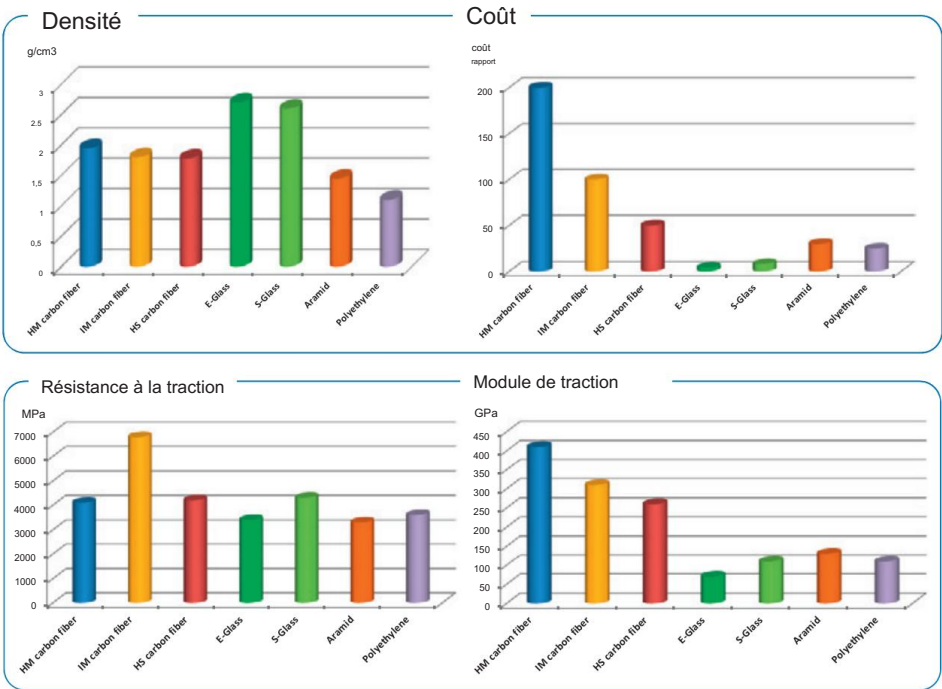


Figure 2.5 Propriétés de diverses fibres

Les multifilaments peuvent être directement fabriqués en préimprégnés unidirectionnels ; en outre, des produits semi-finis textiles, tels que des tissus ou des tissus multi-axiaux (sans frises), peuvent être utilisés. Ces dernières nécessitent cependant une étape intermédiaire de production textile préalable à la fabrication des préimprégnés.

Dans les tissus tissés, les fibres de renforcement sont transformées en produits semi-finis plans en utilisant des techniques de tissage conventionnelles. La figure 2.6 (en haut) montre les modèles de tissage courants. Le choix du motif de tissage a une influence significative sur le traitement ultérieur et les propriétés mécaniques finales du composant. Par exemple, une armure toile est plus facile à manipuler qu'une armure sergée. Cependant, le nombre élevé d'interstices dans l'armure toile provoque une forte ondulation des fibres et conduit ainsi à un profil de propriétés réduit. La réduction du nombre de fibres de trame dans le tissage satin crée un tissu quasi UD avec plus de 80 % de fibres dans le sens chaîne.

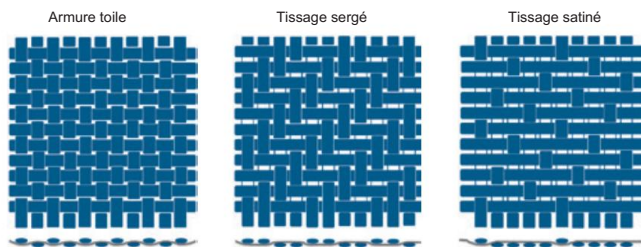


Figure 2.6 Schéma des différents modèles de tissage

Contrairement aux tissus tissés, les tissus non frisés (NCF) ne présentent pas d'ondulations de fibres et peuvent être disposés sous différents angles. Les différents plis sont maintenus en place par des couches adhésives ou par couture. La figure 2.7 montre un empilement de plis quadraxial typique.

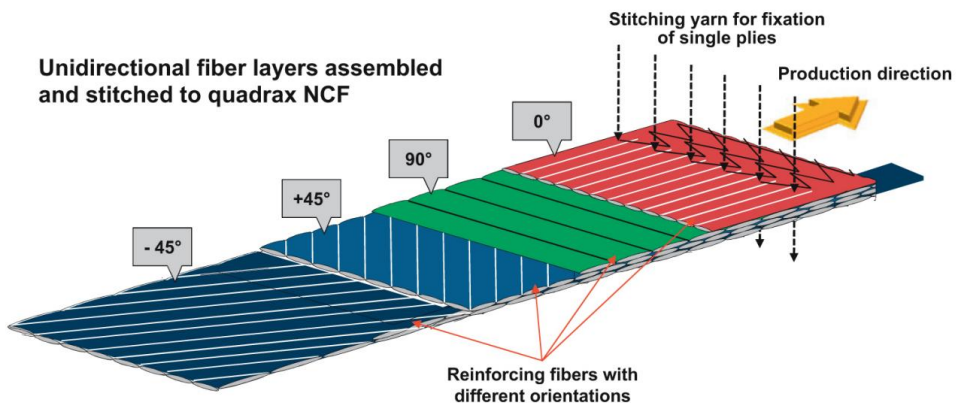


Figure 2.7 Empilement schématique de plis quadraxiaux

Le tableau 2.4 donne un bref aperçu des propriétés et des applications des différents types de renforcement. Des descriptions plus détaillées des fibres et des produits semi-finis peuvent être trouvées dans la littérature [3–6].

Tableau 2.4 Propriétés et applications des différents types de renforcement

Propriétés de renforcement		Applications
Ruban préimprégné UD	Grammages surfaciques variables des fibres de 100 g/m2 à 800 g/m2 (carbone) ou 3 000 g/m2 (verre)	Articles de sport, structures primaires aéronautiques
	Haute résistance et rigidité dans une direction	
Bande fendue/imprégné de remorquage	Haute résistance et rigidité dans une direction	Aéronautique, récipients sous pression, arbres de transmission, tubes
	Convient au placement de fibres sur des géométries 3D complexes	
	Haute résistance et rigidité dans une direction	
	Largeur très étroite pour un placement précis des fibres (1 mm)	
Tissu UD (> 80 % de déformation)	Haute résistance et rigidité principalement dans une seule direction	Aéronautique, industriel, sport et loisirs
	Pour les composants nécessitant une résistance et une rigidité prédominantes dans une direction	
Des tissus équilibrés	Haute résistance et rigidité dans deux directions	Aéronautique, industriel, sport et loisirs
	Très bonnes caractéristiques de manipulation et bon drapé	
	Choix de styles de tissage	
	Possibilité de mélanger les fibres, tissus hybrides possibles	
	Grammages de 20 à 1 000 g/m2	
FCN	Une technologie rapide et rentable	Grandes structures avancéesAérospatiale, e. g. poutres de plancher Industriel
	Résistance et rigidité dans plusieurs directions	
	Pas de sertissage	
	Capacité à optimiser la répartition du poids dans le tissu	
		L'énergie éolienne

2.4 Systèmes préimprégnés

Leur évolution technologique chronologique permet de classer les préimprégnés en quatre générations dans une perspective historique :

- 1ère génération : Matériau fibreux avec système de résine (résine + durcisseur)
- 2e génération : matériau fibreux avec système de résine + modificateur de choc dissous (appelé durcisseur)
- 3ème génération : matériau fibreux avec système de résine + modificateur d'impact dissous + particules thermoplastiques insolubles à la surface du préimprégné pour augmenter encore la résistance aux chocs (appelés préimprégnés interfeuillets)
- 4ème génération : préimprégné interfeuillet à conductivité électrique améliorée, par ex. par exemple, contre les coups de foudre (certains sont encore en développement)

La première génération fournit plus ou moins le modèle pour les préimprégnés et se compose de systèmes de résine très visqueux ; cependant, ils sont relativement fragiles et ne présentent qu'une ténacité limitée. Afin d'améliorer cette propriété, un durcisseur a été ajouté au système de résine, en particulier aux systèmes époxy. Selon l'application spécifique, des caoutchoucs ou des matériaux thermoplastiques ont été utilisés comme durcisseurs.

Aujourd'hui, les préimprégnés de 1ère génération sont souvent utilisés dans les applications intérieures de l'industrie aéronautique. Au cours du développement, il est devenu évident que les thermoplastiques à haute température, tels que le polyéther sulfone (PES) et le polyéther imide (PEI), en particulier, n'affectent pas négativement le module d'Young du système de résine, un effet couramment observé avec les caoutchoucs. C'est pourquoi les préimprégnés de 2ème génération sont préparés à l'aide de PES finement broyé qui est ajouté et dissous dans la résine époxy. Ces types de préimprégnés sont encore couramment utilisés et ont été mis en œuvre avec succès dans des applications aéronautiques, telles que les stabilisateurs horizontaux et verticaux, depuis environ 25 ans.

Avec le développement d'autres pièces d'avions en plastique à base de fibres de carbone, comme les ailes et les fuselages, les exigences en matière de résistance aux chocs ont augmenté et ont ensuite été satisfaites par les préimprégnés de 3ème génération, les préimprégnés interfeuillets, apparus dans les années 1990. Ici, une très fine couche de matériau thermoplastique est appliquée sur la surface. Ce matériau thermoplastique a une granulométrie spécifiée et est insoluble dans le système de résine (Figure 2.8). Ces particules créent une distance uniforme entre les câbles de fibre de carbone dans le composant, où les fissures potentielles peuvent être arrêtées soit par les particules, soit par un mécanisme dit de hackling [2, 3].

La figure 2.8 présente une comparaison entre les préimprégnés de 2ème et 3ème génération. Cela montre clairement la distance accrue entre les câbles de fibre de carbone dans le préimprégné inter-feuilles par rapport au préimprégné de 2ème génération. La surface des pré-imprégnés intercalaires apparaît souvent d'un gris laiteux en raison de la fine poudre thermoplastique ajoutée.

Afin d'optimiser davantage les préimprégnés intercalaires pour les applications aéronautiques, en particulier les applications de fuselage, les propriétés électriques dans le sens de l'épaisseur des préimprégnés de 4e génération nécessitaient une amélioration substantielle, sans compromettre les autres propriétés. Cette amélioration sur mesure des propriétés individuelles constitue l'un des plus grands défis du développement actuel des préimprégnés.

Le nombre de systèmes préimprégnés actuellement disponibles dans le commerce est si élevé qu'il est pratiquement impossible d'en fournir une vue d'ensemble complète. Cette grande variété peut être attribuée à la large gamme d'exigences auxquelles répondent les matériaux préimprégnés dans les différentes applications, allant de l'aviation aux applications industrielles générales.

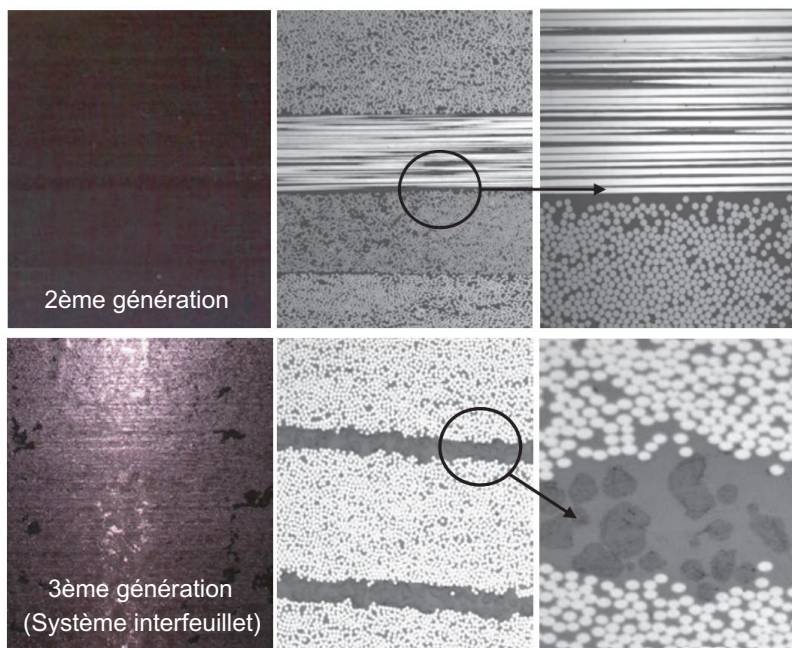


Figure 2.8 Coupe micrographique de surface et polie de préimprégnés de 2e et 3e génération

Le tableau 2.5 illustre une petite partie des systèmes préimprégnés actuellement utilisés dans les applications industrielles. En raison de leur longue histoire, de leurs propriétés polyvalentes et de leur disponibilité immédiate, les systèmes à base d'époxy sont largement acceptés et utilisés. Cependant, les systèmes basés sur le bismaléimide (BMI) et récemment également sur la benzoxazine ont trouvé des applications dans lesquelles les résines époxy ne répondent pas aux exigences, par ex. par exemple, applications à haute température jusqu'à env. 300 °C. Cet aperçu pourrait être étendu pour inclure d'autres types de résines telles que les résines d'esters phénoliques et cyanates, qui sont généralement utilisées dans les applications intérieures et aéronautiques de l'aviation. Les derniers systèmes utilisés pour les applications de l'aviation civile incluent HexPly® M21E et Toray 3911, qui sont utilisés comme préimprégnés structuraux dans les avions A350XWB (Airbus) et B787 (Boeing). Les applications dans le secteur automobile et industriel général incluent les piliers B renforcés par des préimprégnés (construction hybride en tôle d'acier et composite renforcé de fibres) et les pales de rotor pour les éoliennes.

Outre leurs propriétés mécaniques, les systèmes préimprégnés se distinguent également par leur température de durcissement. Cette caractéristique a non seulement une influence décisive sur la température de service maximale du composant durci, mais également sur la technologie de durcissement requise (chapitre 5). En même temps, cela représente l'énorme polyvalence des systèmes préimprégnés disponibles. Au fil du temps, deux plages de températures de durcissement (environ 120 à 140 °C et 180 °C) sont apparues, qui peuvent être attribuées aux agents de durcissement disponibles pour les systèmes à base d'époxy. Pour des applications spécifiques à haute température, les composants sont durcis à des températures allant jusqu'à 240 °C (par exemple, BMI). Généralement, tous les préimprégnés peuvent être utilisés aussi bien avec des techniques de fabrication automatisées (ATL, AFP : voir chapitre 4) qu'avec des méthodes de stratification manuelle.

En raison de leur « architecture » interne, de nombreux préimprégnés doivent être durcis sous pression afin de produire des pièces non poreuses et d'exploiter de manière optimale les propriétés offertes par le matériau. Les applications aéronautiques nécessitent donc souvent un durcissement en autoclave. En raison des coûts d'investissement et d'exploitation élevés associés, il existe une tendance à fabriquer même des pièces structurales en utilisant des technologies de durcissement hors autoclave (OOA). Ici, il est possible de durcir les préimprégnés en utilisant uniquement le vide, sans pression supplémentaire, en composants non poreux. Les préimprégnés destinés aux applications industrielles sont généralement fabriqués pour permettre un durcissement sous vide ou par pression à

Une autre tendance de développement actuelle explore la technologie de placement de fibres sèches (DFP), dans laquelle des mèches sèches en fibre de carbone sont placées dans un moule via AFP puis préconsolidées. Dans une étape ultérieure, les mèches sont mouillées avec de la résine liquide et durcies. Le principal avantage des technologies DFP par rapport aux technologies préimprégnées traditionnelles réside dans le fait que le matériau semi-fini peut être stocké presque indéfiniment à température ambiante. Les préimprégnés, en revanche, nécessitent généralement un stockage au frais en raison de leurs systèmes de résine réactive et ont donc une durée de conservation limitée. Les produits actuellement disponibles dans le commerce incluent HiTape® de Hexcel Composites et PRISM TX1100® de Cytec. L'architecture interne de ces systèmes permet d'obtenir des propriétés mécaniques correspondant à celles des préimprégnés interfeuillets, comblant ainsi l'écart de propriétés existant entre les systèmes de préimprégnés et d'infusion.

Même si les technologies préimprégnées sont déclarées obsolètes depuis des années, l'évolution du marché et le nombre et la diversité des sujets de publications de recherche dans ce domaine montrent le contraire. Inégalés par d'autres matériaux, les préimprégnés permettent des options de construction légères qui ne pourraient autrement pas être réalisées.

2.5 Références

- [1] B. Jahn, E. Witten. Composites-Marktbericht 2013. AVK, CCEV, 2013.
- [2] V. Altstädt. Effet de la matrice polymère sur les propriétés des composites avancés. Makromol. Symp. 1991, 50, 137-145
- [3] V. Altstädt, D. Gerth, H. G. Recker, M. Stängle. Croissance de fissures interlaminaires dans les préimprégnés de troisième génération systèmes. Polymère. 1993, 34, 907-909.
- [4] P. Morgan. Fibres de carbone et leurs composites. 1ère éd. Groupe Taylor et Francis, 2005.
- [5] F. Fourné. Fibres synthétiques. 1ère éd. Munich : Hanser Publishers, 2008, 548.
- [6] M. Neitzel, P. Mitschang. Manuel Verbundwerkstoffe. 1ère éd. Munich : Hanser Publishers, 2004, 57.
- [7] M. Neitzel, P. Mitschang. Manuel Verbundwerkstoffe. 1ère éd. Munich : Hanser Publishers, 2004, 25.

2.6 Informations supplémentaires

Fiches techniques des produits : Hexcel Composites, 2014.

Fiches techniques des produits : Cytec Engineered Materials, 2014.

Fiches techniques du produit : Henkel Loctite. Technologie de résine benzoxazine. 2013.

Fiche technique du produit : Gurit AG. Résine de benzoxazine. 2014.

Fiche technique du produit : Gurit AG. Préimprégné époxy. 2014.

Fiche technique du produit : SGL Technologies GmbH. Préimprégnés haute performance. 2014.

Technologie préimprégné. Composites Hexcel. 2012.

3

Technologie préimprégné

Hauke Lengsfeld et Mike Turner

Ce chapitre fournira un aperçu du développement historique de la technologie des préimprégnés. Nous détaillerons les technologies actuellement les plus importantes utilisées pour la fabrication de matériaux préimprégnés à l'échelle industrielle ainsi qu'un certain nombre de variantes de préimprégnés.

3.1 Contexte historique

La plupart des acteurs de l'industrie de la fabrication de composites connaissent le développement et l'industrialisation de la technologie des préimprégnés.

Au début des années 1940, le Dr Norman De Bruyne a développé le principe général des matériaux composites renforcés de fibres pour des applications structurelles (il a fondé Aero Re-search Ltd en 1934 dans ce but). Le matériau qu'il a développé était à base de fibres de lin et d'une résine phénol-formaldéhyde comme matrice. Ce matériau était placé dans des moules en longs segments, pressé et durci. Les segments ont ensuite été découpés mécaniquement et utilisés comme tout premier composant composite renforcé de fibres.

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, cette technique était utilisée pour produire des pièces structurelles de fuselage renforcées en fibres de lin pour les avions « Spitfire ». De Bruyne était convaincu que des versions convenablement adaptées de ses matériaux pouvaient être utilisées pour la production d'avions plus gros. Ses composites renforcés de fibres, fabriqués à partir de résines therm durcissables et de fibres orientées, offraient les propriétés requises en termes de résistance, de rigidité et de résistance à la fatigue.

En 1963, Leslie Phillips et son équipe du Royal Aircraft establishment (RAE), à Farnborough, au Royaume-Uni, étaient des pionniers dans le domaine des fibres pré-imprégnées. Ils ont développé la première fibre de carbone sous la forme d'un câble multifilament imprégné d'une matrice de résine pouvant être utilisée pour fabriquer des composants structurels. Il représentait le concept de préimprégnés unidirectionnels (UD prepreg), ou feuilles pré-imprégnées.

S'appuyant sur les développements réalisés à Farnborough, la société britannique Courtaulds a été l'une des premières à étendre le processus de fabrication des fibres de carbone comme

câbles de filaments (types de fibres Grafil XA-S et Grafil HM-S), adaptés comme renfort dans les préimprégnés.

Au début des années 1970, CIBA (Bonded Structures Ltd.) à Duxford Cambridge, Royaume-Uni, a utilisé les résultats des travaux de De Bruyne sur les matériaux pré-imprégnés et a développé un préimprégné avec des fibres de carbone fabriquées par Courtaulds et de la résine époxy. Ils ont rapidement réalisé que les préimprégnés nécessitaient des fibres avec une orientation parallèle élevée et un contrôle précis du poids surfacique des fibres et de la matrice de résine afin d'obtenir et de maintenir des profils de propriétés élevés. L'objectif de développer un matériau préimprégné facile à fabriquer et à traiter a inspiré de nombreux projets de recherche et études. Aujourd'hui encore, les efforts de recherche se concentrent sur l'amélioration et le développement des matériaux préimprégnés.

La première machine à préimprégnés consistait en un grand enrouleur à tambour sur lequel des câbles de fibre de carbone secs étaient enroulés puis imprégnés dans un bain de résine époxy. Cette méthode de fabrication de préimprégnés relativement peu coûteuse et nécessitant peu d'efforts est toujours utilisée à des fins d'évaluation et de recherche. Dans le même temps, les revêtements en résine époxy ont été introduits avec succès comme adhésifs pour les liaisons métal-métal dans l'aéronautique et d'autres industries. Il était logique d'utiliser ces revêtements de résine pour la fabrication de préimprégnés UD de grande valeur. Cela a conduit au développement de machines de stratification/revêtement spécifiques qui fabriquaient ces revêtements de résine et ont également permis à la combinaison d'un film de résine et de fibres de renforcement sèches de former des préimprégnés avec un poids surfacique (PAW) constant et prévisible. La grande répétabilité du poids surfacique du préimprégné, qui est déterminé par le poids surfacique de la résine et du poids surfacique des fibres (FAW), est une caractéristique de qualité importante des préimprégnés de grande valeur, en particulier dans la fabrication de composants composites pour l'industrie aéronautique. Aujourd'hui, cette caractéristique est contrôlée par la vitesse de ligne ainsi que par la température et la pression d'imprégnation, permettant d'obtenir des matériaux pré-imprégnés à l'échelle industrielle. Généralement, l'épaisseur du préimprégné est comprise entre 0,127 mm (0,005") et 0,254 mm.

On a rapidement découvert qu'il était possible de fabriquer des composants composites en fibres légers et à haute résistance en coupant et en superposant de manière appropriée plusieurs pré-imprégnés. Au cours des années 1970 et 1980, des tissus ont été développés pour renforcer les préimprégnés. Ici, les propriétés des composants dans différentes directions pouvaient être adaptées en choisissant différents tissages, réalisés sur des métiers à tisser adaptés à la production de soie ; ces machines étaient à l'origine utilisées pour confectionner des vêtements en soie pour les aristocrates.

Les matériaux préimprégnés de pointe actuels se sont développés dans le contexte de technologies connexes au cours des 50 dernières années. En fait, le nombre de matériaux en fibre de carbone est aujourd'hui nettement plus élevé en raison du développement des fibres IM et HS.

De plus, l'utilisation de fibres naturelles, comme le lin, comme matériaux de renforcement suscite un regain d'intérêt dans les projets de recherche et développement. En peu de temps, les industries de fabrication et de transformation de la fibre de carbone sont devenues

technologies sophistiquées. Partant de quelques matériaux et composites de fibres sélectionnés, qui ont été produits selon des processus manuels très exigeants en main-d'œuvre, diverses industries, notamment l'industrie aéronautique et automobile, s'appuient aujourd'hui sur des composites légers, rigides et hautes performances qui ne pourraient pas être fabriqués. produits s'il n'y avait pas de matériaux préimprégnés et de processus entièrement automatisés.

3.2 Introduction : méthodes de fabrication

Les préimprégnés, en tant que produits semi-finis contenant des fibres pré-imprégnées (Figure 3.1), sont une condition préalable à la fabrication de composites de fibres légers de haute qualité et optimisés en termes de charge. Les techniques et processus de fabrication actuels garantissent une qualité constante des préimprégnés, par ex. par exemple, en termes de teneur en FAW et en résine, à un niveau très élevé. D'une part, cela simplifie le traitement pour le fabricant et, d'autre part, cela permet la production reproductible de composants de haute qualité.

Les préimprégnés sont toujours constitués d'une combinaison d'une matrice généralement très visqueuse et d'un renfort fibreux. Une fois que le matériau de renfort a été pré-imprégné d'une matrice, il est considéré comme un matériau préimprégné. Des matériaux thermoplastiques et thermodurcissables (systèmes de résines réactives) peuvent être utilisés comme matrices (voir également le chapitre 2) [2]. Dans ce qui suit, nous aborderons la production de préimprégnés thermodurcissables.

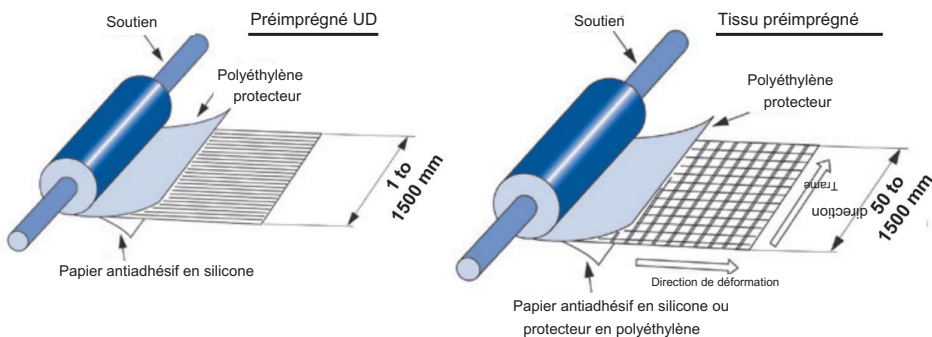


Figure 3.1 Forme de livraison du préimprégné UD (à gauche) et du préimprégné en tissu (à droite) sur supports [Autorisation : © Hexcel Corporation]

Les renforts fibreux sont fournis sous différentes formes :

- tissus uni, bi et multidirectionnels

- tissus

- non-tissés et nattes en fibres aléatoires

En fonction de la structure de renforcement, les techniques de traitement comprennent des ensembles de cantres (pour les stratifiés) et des dérouleurs de rouleaux pour les tissus.

Aujourd'hui, il existe de nombreuses méthodes et concepts de machines différents pour la production de lignes de revêtement. Ils sont capables d'utiliser différents matériaux fibreux et de les combiner avec un large choix de résines matricielles. Les technologies de pointe comprennent :

procédés de revêtement en solution (également appelés procédés par trempage (solvant)) (Figure 3.2)

procédés thermofusibles (Figure 3.2)

systèmes de couteaux

diffusion de poudre

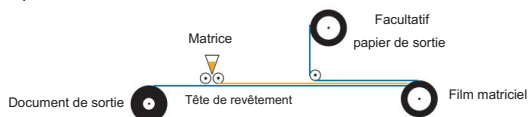
systèmes de matrices à fentes

Certains procédés, comme la diffusion de poudre, ont été initialement développés pour les matrices thermoplastiques, mais adaptés ensuite au traitement des thermodurcissables. Cependant, ces procédés n'ont pas trouvé d'utilisation généralisée à l'échelle industrielle. Il existe aujourd'hui deux méthodes d'imprégnation majeures dans la pratique industrielle : le procédé par trempage (solvant) et le procédé thermofusible [2].

Non seulement les matériaux de base nécessitent une manipulation prudente, mais de nombreux paramètres, notamment le bobinage, le contrôle, l'imprégnation et le séchage, doivent être pris en compte et adaptés individuellement en fonction du type de renfort, de la matrice d'imprégnation et des propriétés du produit final. 1].

Les préimprégnés thermodurcissables sont disponibles en quatre variantes typiques : préimprégnés UD, préimprégnés en tissu, ruban fendu et préimprégnés de remorquage.

Étape 1 – Production du film



Étape 2 – Transfert du film

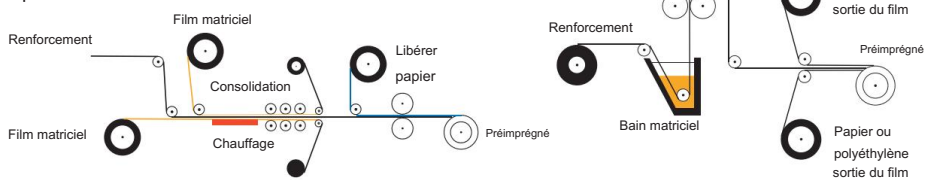


Figure 3.2 Méthodes de fabrication, à gauche : procédé thermofusible ; à droite : procédé au solvant

3.2.1 Conception d'une ligne de production de préimprégnés

En principe, une ligne de production de préimprégnés se compose des stations suivantes :

Ensemble de cantres pour mèches ou dérouleur de rouleaux pour tissus

Unité de revêtement

Unité de calendrage

Station de coupe/rognage

Station de bobinage pour préimprégné UD ou tissu

La figure 3.3 montre la conception schématique d'une ligne produisant des préimprégnés de fibres UD.

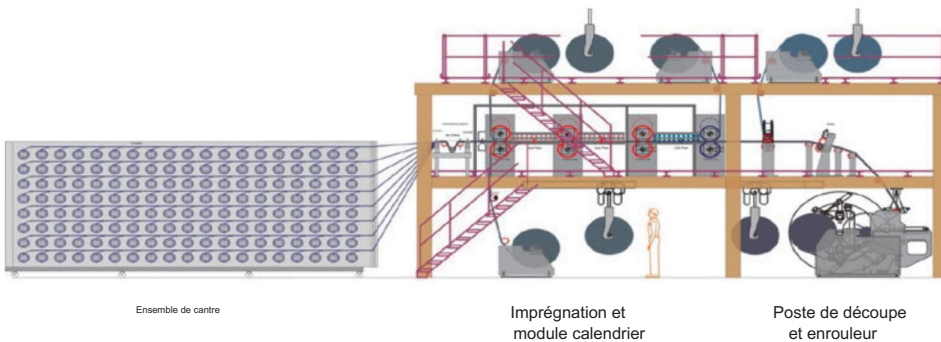


Figure 3.3 Conception schématique d'une ligne de préimprégnés [Autorisation : © KROENERT GmbH & Co KG]

Selon que le préimprégné est fabriqué à l'aide de procédés au solvant ou à chaud, la conception de la ligne de préimprégnés est spécifique au processus ou au matériau.

3.2.2 Méthodes de fabrication des préimprégnés

Dans ce qui suit, nous fournirons une description plus détaillée des cycles de conception et de processus pour une ligne de préimprégnés UD utilisant un procédé thermofusible et une ligne de préimprégnés textiles utilisant un procédé au solvant.

3.2.2.1 Procédés de fusion à chaud

Comme mentionné précédemment dans ce chapitre, les procédés thermofusibles nécessitent la fabrication d'un revêtement de résine approprié (Figure 3.4). Pour obtenir ces revêtements, des matériaux de base comprenant des résines époxy (d'une viscosité d'environ 20 Pa.s), des durcisseurs (modificateurs de choc), des agents de durcissement et éventuellement d'autres composants sont mélangés. Étant donné que les systèmes de résine préimprégnés sont extrêmement visqueux (en raison du durcisseur) et durcissent à des températures élevées, ces composés réactionnels sont souvent homogénéisés à l'aide d'extrudeuses. Le système de résine pré-mélangée est extrudé puis appliqué sur du silicone.

papier support enduit de cône par des rouleaux de calandre chauffés. Par la suite, le matériau est roulé sur des noyaux et réfrigéré afin de ralentir la réaction de durcissement et de conserver le matériau « frais » (collant) pour l'étape de production suivante. Jusqu'au milieu des années 2000, les films de résine étaient souvent produits par lots (de manière discontinue). Ici, le système de résine était souvent fourni sous forme de blocs qui étaient soit réfrigérés pour le stockage, soit utilisés directement pour la production d'un film enduit de résine. Les blocs ont été chauffés dans l'unité de revêtement et la résine époxy transférée sur le papier support.

Avec l'utilisation croissante de matériaux préimprégnés dans l'aéronautique et d'autres industries, le procédé dit de mélange continu a été introduit. Il permet la production continue de grandes quantités d'un film de résine particulier. Ce procédé présente l'avantage de fournir une qualité de produit constante (par exemple, en termes de poids surfacique) même pour les séries de production à l'échelle industrielle. De grandes quantités de films de résine peuvent être produites dans un emplacement central et fournies aux fabricants, généralement des fabricants de préimprégnés proches des utilisateurs finaux, à un coût logistique bien inférieur, tandis que les préimprégnés prêts à l'emploi nécessiteraient un transport réfrigéré. La chaîne de fabrication peut être davantage automatisée en alimentant directement le film de résine dans une ligne de préimprégné. Cette approche est étudiée pour la production en série de composants renforcés de fibres, par ex. par exemple, pour les applications automobiles.

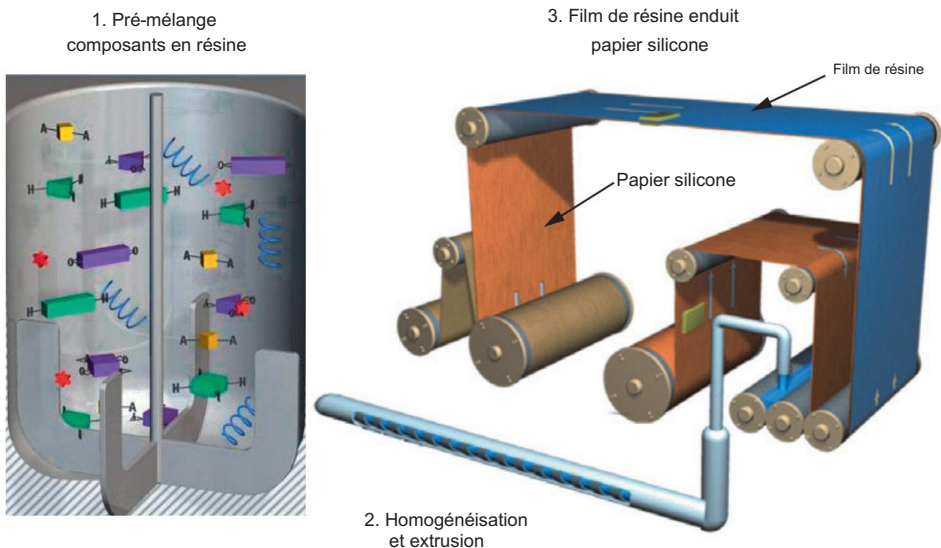


Figure 3.4 Schéma de production d'un film de résine [Autorisation : © Hexcel Corporation]

La figure 3.5 montre schématiquement la séquence des étapes du processus dans une ligne de préimprégnés thermofusibles. Sur le côté gauche de la ligne de préimprégnés se trouve un ensemble de cantres contenant des bobines de fibres de verre ou de carbone. Un credo typique peut contenir plusieurs centaines de bobines, alimentant la ligne des deux côtés. Le nombre de bobines est déterminé par la valeur nominale

largeur du préimprégné produit et de son FAW. À partir de chaque bobine, une mèche ou un câble de fibre est introduit dans la machine à préimprégné par des rouleaux de guidage et des œillets de fibre. La tension des fibres de chaque mèche ou câble est un paramètre crucial pour des préimprégnés de haute qualité. Afin de régler et de contrôler la tension des fibres, chaque axe du jeu de cantres est équipé d'un mécanisme de freinage spécial qui maintient un niveau uniforme de tension des fibres sur toutes les bobines. Entre autres facteurs, la tension des fibres influence la résistance à la traction du matériau durci. Il empêche également le flambage des fibres et les plis dans le préimprégné fini.

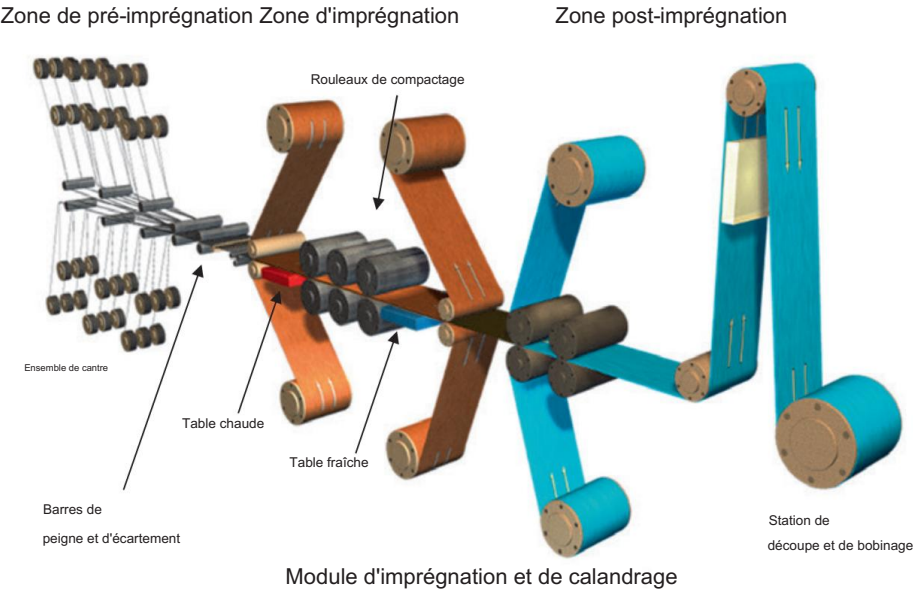


Figure 3.5 Étapes schématiques du processus des systèmes thermofusibles [Source : © Hexcel Corporation]

Ensuite, les mèches de fibres passent à travers un peigne dans la zone de pré-imprégnation (Figure 3.6) qui maintient leur intégrité parallèle et évite les croisements et les dommages. De plus, cette étape définit la largeur nominale du lit de fibres et crée une surface uniforme et fermée de fibres UD. Simultanément, le nombre de mèches par trou de peigne définit le FAW du préimprégné fini.

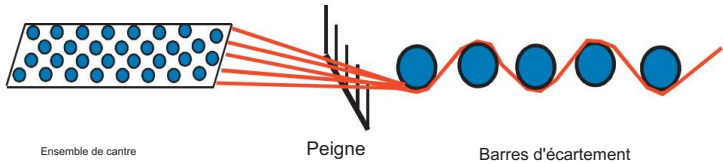
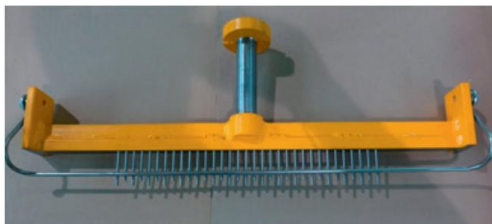


Figure 3.6 Peignes et barres d'écartement, schématique



Graphique 3.7

Peigne dans la zone de pré-imprégnation

[Autorisation : Université de Bayreuth,

Département de génie des polymères, Th.

Neumeyer]

Désormais, les mèches/étoupes de fibres sont guidées à travers plusieurs barres d'étalement et de guidage afin d'obtenir la tension de fibres nécessaire pour les introduire dans la zone d'imprégnation. La tension est contrôlée par le pas des barres de guidage. Les barres d'épandage permettent également de contrôler le FAW sur la largeur de production, qui est déterminée par le peigne. En fonction de la largeur des mèches de fibres, des FAW de 134 g/m² à 268 g/m² peuvent être atteints dans les préimprégnés contenant 12 k (= 12 000) fibres de carbone. Les barres d'étalement facilitent également une répartition homogène des fibres sur la zone pré-imprégnée, ce qui est crucial pour obtenir une imprégnation uniforme lors de l'étape d'imprégnation suivante. En outre, une répartition uniforme du FAW dans tout le composant est une condition préalable pour des applications hautes performances avec des propriétés constantes. Les fibres et l'étalement influencent également la mouillabilité du lit de fibres et donc divers autres paramètres de production et de traitement.

Lors de l'étape suivante, les fibres sont tirées dans la zone d'imprégnation (Figure 3.5).

Ici, le lit de fibres est pris en sandwich entre des films de résine sur des papiers supports enduits de silicone et tiré à travers le premier rouleau de calandre (procédé à 2 films). La teneur en résine dans le préimprégné non durci (fournie en %) peut être contrôlée en faisant varier le poids surfacique des films de résine. Le poids surfacique des deux films de résine n'est pas nécessairement identique. L'augmentation de la teneur en résine d'un seul côté permet d'améliorer le collant du matériau préimprégné. Les teneurs typiques en résine vont de 30 à 45 % en poids pour les préimprégnés en fibre de carbone et de 40 à 60 % en poids pour les préimprégnés en fibre de verre. Dans une deuxième étape d'imprégnation, un film de résine supplémentaire peut être appliqué (sur une ou sur les deux faces) afin d'introduire des propriétés supplémentaires ou d'améliorer l'adhérence (procédé à 4 films).

Une fois passé dans la première calandre, le matériau est chauffé sur une table chauffante infrarouge afin de diminuer la viscosité de la résine et faciliter le mouillage des fibres. Des valeurs de viscosité d'environ 10 Pa.s sont typiques. La température de chauffage dépend de la matrice de résine, de la vitesse de transport de la ligne de ruban et du degré d'imprégnation souhaité du préimprégné. Après la table chauffante, le matériau chauffé passe à travers plusieurs rouleaux de calandre, pressant la matrice de résine dans le lit de fibres. Ces rouleaux de calandre peuvent également être chauffés afin de contrôler la viscosité de la résine. La distance entre les rouleaux de calandre (compactage) contrôle et détermine le degré d'imprégnation du préimprégné. Cette distance est définie soit par le jeu du rouleau, soit par la pression appliquée. Le fait que les différents paramètres,

tels que la vitesse de ligne, la température, le jeu des rouleaux de calandre et la viscosité de la matrice, s'influencent mutuellement et contribuent à la complexité et à la difficulté du processus d'imprégnation. La température du processus est particulièrement critique, car à chaque étape de traitement, le système de résine préimprégné subira une réaction limitée, favorisée par des températures élevées. Dans une certaine mesure, cependant, une certaine pré-réaction est souvent souhaitée afin d'influencer la viscosité de la matrice de résine et de diminuer l'écoulement de la résine pendant le durcissement et la fabrication ultérieure des composants. Ces systèmes sont également appelés systèmes à débit contrôlé (état de scène B, voir section 3.2.4 et chapitre 5).

Après imprégnation, le matériau est refroidi à env. température ambiante sur une table de refroidissement puis pénètre dans la zone de post-imprégnation. En fonction du mode de livraison et des propriétés du matériau, le papier support du film de résine (papier de traitement) est retiré (complètement ou partiellement) et remplacé par un nouveau papier enduit de silicone et/ou un film de polyéthylène [3, 4].

Le papier ou le film est nécessaire pour éviter toute contamination, pour garantir que le préimprégné n'adhère pas à lui-même (séparation) lors du stockage sur mandrins et pour faciliter les étapes de traitement ultérieures (superposition manuelle ou processus automatisés). Après le laminage du papier/film, le matériau est découpé par des couteaux rotatifs et peut être coupé selon les spécifications du client (les largeurs typiques sont de 150/300/600 mm). Enfin, le matériau est enroulé sur des mandrins en carton, hermétiquement scellé dans des sacs en film et surgelé afin de ralentir la réaction de durcissement du système matriciel en résine.

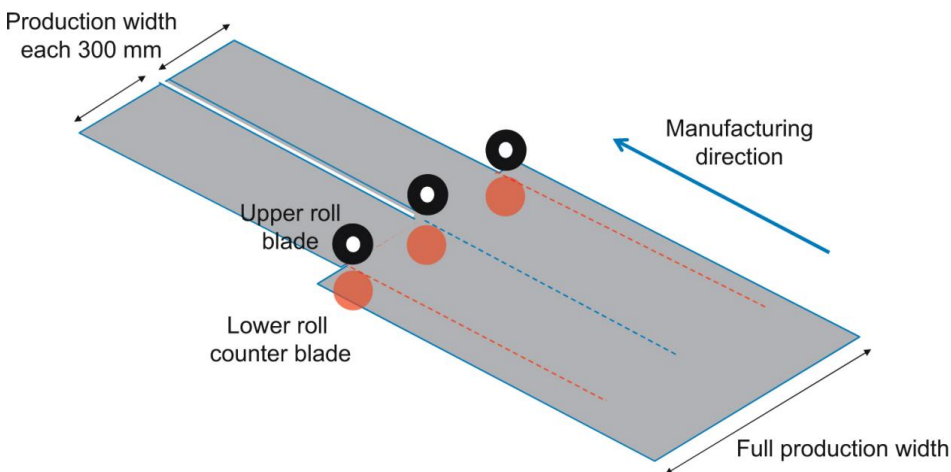


Figure 3.8 Découpe du préimprégné à la largeur nominale pendant le traitement

La forme de livraison du matériau préimprégné est déterminée par le processus de fabrication ultérieur prévu. Les matériaux de pose automatisée de rubans (Figure 3.9) et les matériaux destinés à la fabrication de rubans fendus (Figure 3.12) sont laminés sur papier ;

les matériaux déposés à la main sont souvent recouverts d'un film de polyéthylène sur l'autre face afin de faciliter le découpage (soit au cutter, soit à la main) et également de protéger le matériau de la contamination (voir section 4.2). Après retrait du préimprégné, ces matériaux ne doivent plus être utilisés pour des étapes de traitement ultérieures et sont éliminés. Avec les chutes et autres déchets de production, ils sont recyclés et réutilisés dans d'autres produits.



Figure 3.9 Formes de livraison de préimprégnés : préimprégné ATL sur noyau, enveloppé dans un film (à gauche), avec film et papier de séparation (à droite)

3.2.2.2 Méthode de revêtement dans un solvant/immersion dans un solvant

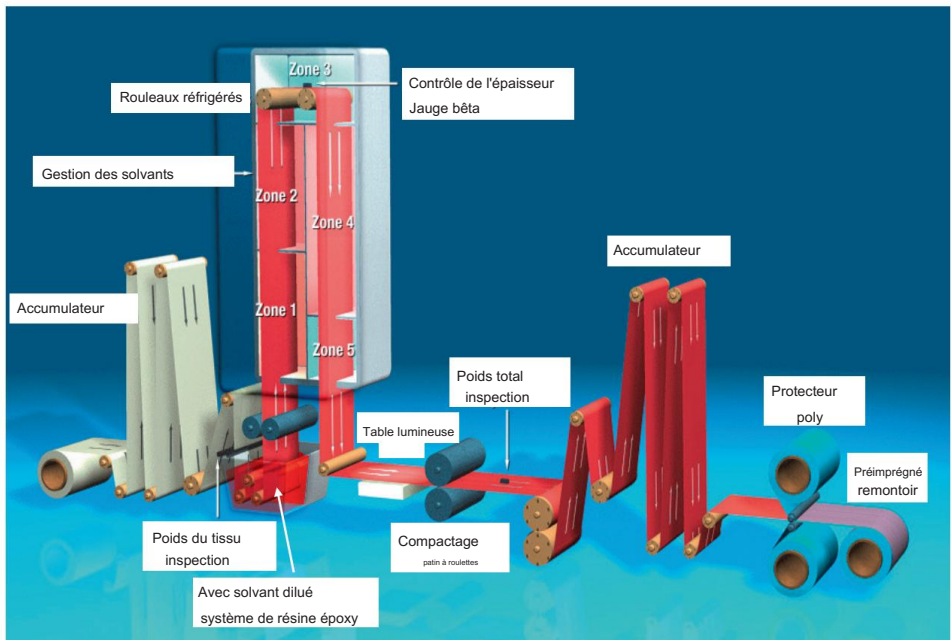


Figure 3.10 Schéma du processus de revêtement au solvant [Autorisation : © Hexcel Corporation]

Le processus de revêtement au solvant/méthode de trempage dans un solvant est utilisé pour imprégner les tissus ou les câbles de fibres individuels (préimprégnés de câbles) (Figure 3.10). Ici, le jeu de cantres utilisé dans le processus de thermofusible est remplacé par un dérouleur de rouleaux pour introduire le produit en tissu semi-fini dans la ligne. La tension du tissu est réglée et contrôlée (contrôle de traction) afin d'éviter la formation de plis et le gauchissement du matériau de renfort. Le matériau passe ensuite dans un bain de résine solvatée (procédé par trempage) où les forces capillaires assurent le mouillage du matériau. La viscosité de la solution de résine est contrôlée par la température du bain et la teneur en solvant du bain. L'excès de résine en surface est éliminé par une racle et collecté. Les rouleaux de calandre sont utilisés pour contrôler la teneur en résine et l'épaisseur du préimprégné. Le contenu volatil du matériau imprégné est en grande partie évaporé par la chaleur et l'air de recirculation dans une tour de séchage ultérieure et récupéré pour répondre aux exigences en matière de coût et d'environnement.

Lors de cette étape, l'épaisseur du matériau imprégné est testée. Une fois que la teneur en substances volatiles a atteint le niveau souhaité, le préimprégné est refroidi par des rouleaux refroidis afin d'arrêter le flux de résine et la réaction de durcissement. Après passage dans la tour, le matériau est soumis à un test optique (table lumineuse) pour détecter d'éventuels défauts avant de déterminer son poids surfacique. Le matériau imprégné est ensuite déposé sur des films ou du papier support enduit de silicone pour le protéger du collage et de la contamination, enroulé sur des noyaux et emballé dans des sacs en film. Contrairement aux préimprégnés thermofusibles, les préimprégnés enduits de solution ne sont pas découpés ; leur largeur est déterminée par la largeur du tissu de renfort.

Le procédé de trempage dans un solvant offre certains avantages par rapport au procédé de fusion à chaud. Par exemple, des systèmes de résine à très haute viscosité ou des systèmes avec des particules insolubles peuvent être traités relativement facilement grâce à un ajustement approprié de la teneur en solvant. De plus, le mouillage du tissu est très bon, car la résine pénètre presque complètement dans les filaments de fibres et remplit les interstices. Les préimprégnés fabriqués par revêtement au solvant présentent souvent une adhérence plus élevée que les préimprégnés thermofusibles comparables. Leur collant est déterminé par des paramètres tels que la teneur en solvant résiduel dans le préimprégné, la charge thermique dans la tour, le système de résine lui-même et la fibre/type de tissu [3, 4].

Un inconvénient du procédé de revêtement au solvant est le fait qu'il ne peut pas être utilisé pour une imprégnation continue des fibres UD. Un lit de fibres UD homogène sans fixation par trame serait détruit dans le bain de solvant ; les faisceaux de fibres se désintègreraient, créant des espaces entre les fibres. Le seul procédé de revêtement au solvant disponible pour les fibres UD est l'utilisation d'un système dit à tambour, dans lequel les faisceaux de fibres sont enroulés sur des tambours quadrangulaires ou octogonaux, puis imprégnés par un processus de trempage. Ce procédé ne convient que pour de petites séries de production et à des fins expérimentales.

Dans le passé, le procédé thermofusible n'était pas aussi largement utilisé que le procédé de revêtement au solvant en raison de sa gestion de processus plutôt difficile et de ses applications limitées. Cependant, en raison de l'évolution des réglementations environnementales et de l'augmentation

En raison des coûts de matériaux et d'élimination des déchets liés aux solvants organiques, les procédés thermofusibles sont de plus en plus acceptés pour la fabrication de préimprégnés textiles depuis env. 2005.

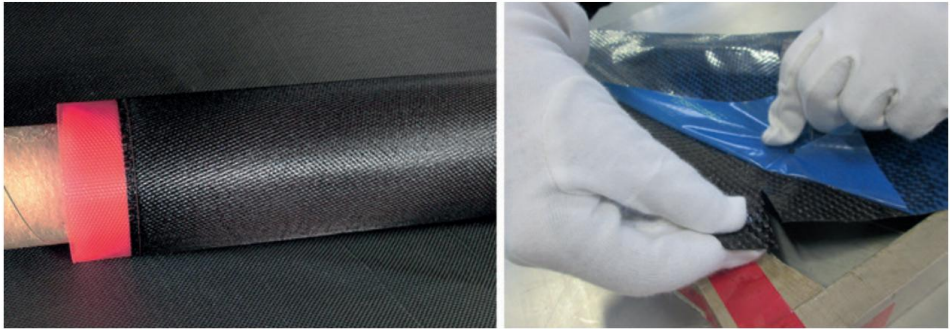


Figure 3.11 Tissu préimprégné [Autorisation : © Hexcel Corporation]

3.2.3 Variations des préimprégnés

Outre les « variantes de préimprégnés standard », il existe un certain nombre d'autres préimprégnés, notamment les préimprégnés de remorquage et les bandes fendues. Alors que ces derniers ne sont sur le marché que depuis env. Depuis 2006, les préimprégnés sont disponibles depuis le début de la technologie des préimprégnés.

3.2.3.1 Bande fendue

Les bandes fendues (Figure 3.12) sont utilisées dans les lignes de production de placement automatique de fibres (AFP), voir section 4.4. Ici, le préimprégné UD est d'abord produit sous forme de ruban parent (600 mm ou plus large) et, lors d'un processus de découpe supplémentaire, découpé en bandes étroites à l'aide de couteaux rotatifs, appliqué sur un film antiadhésif et rembobiné sur des bobines. En fonction de l'application future, les rubans sont fournis dans des largeurs généralement de 3,2 mm (1/8"), 6,4 mm (1/4") et 12,7 mm (1/2"). Les poids standard des bobines sont généralement de 3 kg, 7 kg ou 11 kg. L'avantage de cette variante de préimprégné réside dans son excellent drapé sur des surfaces tridimensionnelles lors de l'utilisation de processus automatisés et dans sa haute précision en termes de tolérances de largeur de coupe (jusqu'à 1/10 mm), indépendamment de la largeur du ruban. Ces tolérances étroites sont nécessaires dans les applications aérospace afin de produire des composants légers de haute qualité avec des propriétés constantes. En raison de leur reproductibilité aisée, les rubans fendus offrent également des tolérances étroites en termes de teneur en FAW et en résine.

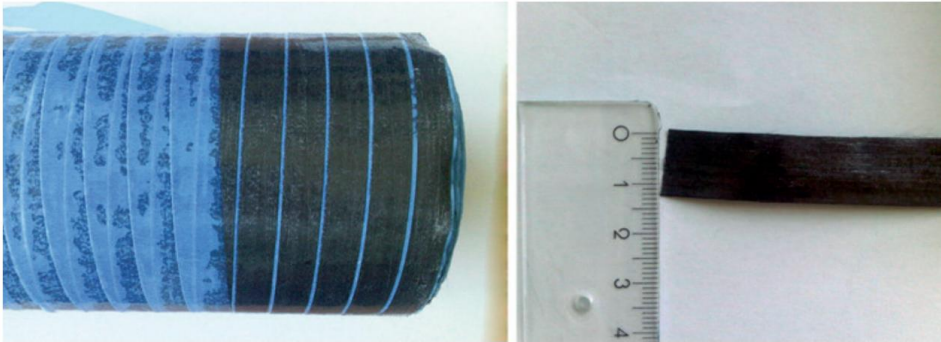


Figure 3.12 Ruban fendu 1/2" avec libération du film sur bobine

Cependant, le processus de refendage avec ses tolérances étroites entraîne un prix au m² considérablement plus élevé par rapport aux préimprégnés UD « normaux ». De plus, les préimprégnés sont exposés à des charges thermiques supplémentaires car les rubans sont refendus à température ambiante, sans aucun refroidissement. Cela réduit le temps pendant lequel une adhérence suffisante peut être garantie. La maniabilité typique des bandes fendues sur les systèmes AFP est d'env. 8 à 10 jours.

3.2.3.2 Éléments de remorquage

Les tow pregs sont des mèches de fibres imprégnées qui sont généralement mouillées lors d'un processus de revêtement en solution (section 3.2.2.2), puis enroulées sur un noyau en carton. Pour éviter que les câbles ne collent, ceux-ci sont enroulés sur un film séparateur. Les mèches sont étalées (par exemple pneumatiquement) avant l'imprégnation afin d'obtenir une largeur homogène et uniforme du ruban et de fixer le FAW de l'imprégné de câble fini. Ce type de préimprégné est particulièrement adapté aux processus d'enroulement filamentaire et est souvent fabriqué in situ et immédiatement transformé en composants finaux. Son avantage par rapport aux préimprégnés et aux rubans fendus standards réside dans son prix considérablement inférieur et sa flexibilité concernant les systèmes de résine appropriés. La seule exigence concernant le système de résine est une viscosité suffisamment faible (si nécessaire par addition de solvant) pour obtenir une imprégnation suffisante des câbles de fibres. Contrairement aux préimprégnés standards et aux bandes fendues, la largeur du préimprégné de câble ne peut pas être contrôlée dans des tolérances étroites, mais varie plutôt en fonction de la largeur de la mèche [5, 6].

3.2.4 Effet des paramètres de fabrication

Les propriétés du préimprégné sont affectées par les paramètres et processus de traitement sélectionnés. Ce qui suit décrit et discutera de certaines de ces propriétés et des paramètres qui les influencent.

3.2.4.1 Teneur en résine

La teneur en résine d'un préimprégné est relativement facile à régler et à contrôler. Avec le FAW, il définit l'épaisseur du pli durci (CPT) d'un pli préimprégné après durcissement. La teneur en résine d'un préimprégné est donnée en % en poids par rapport au FAW (Section 3.2.2.1) et fournit le poids total du préimprégné lorsqu'il est ajouté au FAW.

En fonction du système de résine et du degré d'imprégnation, la teneur en résine détermine le collant et l'écoulement de la résine (écoulement de l'excès de résine) du préimprégné. Alors que les systèmes préimprégnés de 1ère et 2ème génération avaient souvent une teneur en résine plus élevée et présentaient donc un écoulement de résine plus élevé pendant le durcissement, les systèmes préimprégnés actuels de 3ème génération sont fabriqués sous forme de préimprégnés dits sans saignement afin d'optimiser le poids des composants. Ici, la teneur en résine est réglée avec précision pour correspondre aux exigences en matière de teneur en volume de fibres et d'épaisseur de pli du composant final.

Le tableau 3.1 et la figure 3.13 illustrent comment les propriétés physiques d'un préimprégné changent lorsque la teneur en résine varie de 35 % en poids à poids surfacique constant (par exemple 134 g/m2). Des changements significatifs sont observés dans l'épaisseur du pli durci (CPT) et la teneur en volume de fibres (FVC).

Tableau 3.1 Propriétés physiques du préimprégné [Avec l'aimable autorisation : © Hexcel Corporation]

	Unité	Propriétés physiques du préimprégné																
Zone préimprégnée	g/m2	197	199	200	202	203	205	206	208	209					211	213	214	216
poids																		
Résine contenu	%	32,0	32,5	33	33,5	34	34,5			35	35,5	36	36,5	37	37,5			38
Poids surfacique de la résine	g/m2	63	65	66	68	69	71	72	74	75	77	79	80	82				
Fibre un vrai poids	g/m2	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134
Volume de résine contenu	%	39,30	39,85	40,39	40,94	41,48	42,02	42,56	43,09	43,63	44,16	44,69	45,22	45,75				
Teneur en volume de fibres	%	60,70	60,15	59,61	59,06	58,52	57,98	57,44	56,91	56,37	55,84	55,31	54,78	54,25				
Épaisseur du pli durci (CPT)	mm	0,123	0,124	0,126	0,127	0,128	0,129	0,13	0,132	0,133	0,134	0,135	0,137	0,138				
Densité du site composite	g/cm3	1,60	1,60	1,59	1,59	1,59			1,58	1,58	1,58	1,58	1,57	1,57	1,57			1,57

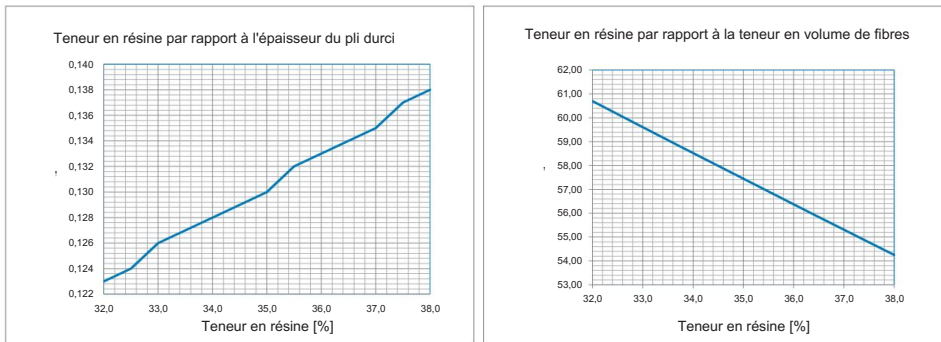


Figure 3.13 Modifications du CPT et du FVC avec la teneur en résine préimprégnée

3.2.4.2 Niveau d'imprégnation

Un autre paramètre important est le niveau d'imprégnation du préimprégné. Il indique dans quelle mesure la matrice de résine a mouillé le matériau fibreux pendant le processus de fabrication.

Le niveau d'imprégnation et sa possibilité d'ajustement dépendent principalement du poids surfacique des fibres et de la résine ainsi que de la méthode d'imprégnation. L'imprégnation adéquate de la fibre de renfort influence non seulement la répartition de la résine pendant le durcissement, mais aussi sa transformabilité ultérieure, par ex. par exemple, par des processus automatisés.

Les procédés de revêtement par solvant fournissent généralement des matériaux préimprégnés entièrement imprégnés. Pour les préimprégnés en tissu, cela est souhaitable afin d'éliminer les poches d'air et la formation de porosités dans le composant final lors du traitement ultérieur, car il n'est généralement pas possible d'éliminer l'air emprisonné dans les interstices du tissu par post-imprégnation in situ pendant le durcissement. Cependant, ce comportement difficile du matériau est également affecté par d'autres paramètres tels que la géométrie et la taille des composants, ainsi que la gestion du processus pendant le durcissement.

Les procédés thermofusibles permettent d'ajuster le degré d'imprégnation dans certaines limites, car ici la composition et le poids du film de résine, le FAW, ainsi que la température et la durée d'imprégnation peuvent varier. Contrairement aux préimprégnés en tissu, de nombreux préimprégnés UD ne sont pas entièrement imprégnés, mais contiennent une fine zone intérieure de filaments secs qui permet l'écoulement de la résine et donc l'élimination de l'air. L'utilisation de préimprégnés UD totalement imprégnés peut conduire à la formation de porosités dans la pièce composite, notamment dans les pièces de grande surface.

La figure 3.14 montre quelques paramètres et contraintes influençant le niveau d'imprégnation :

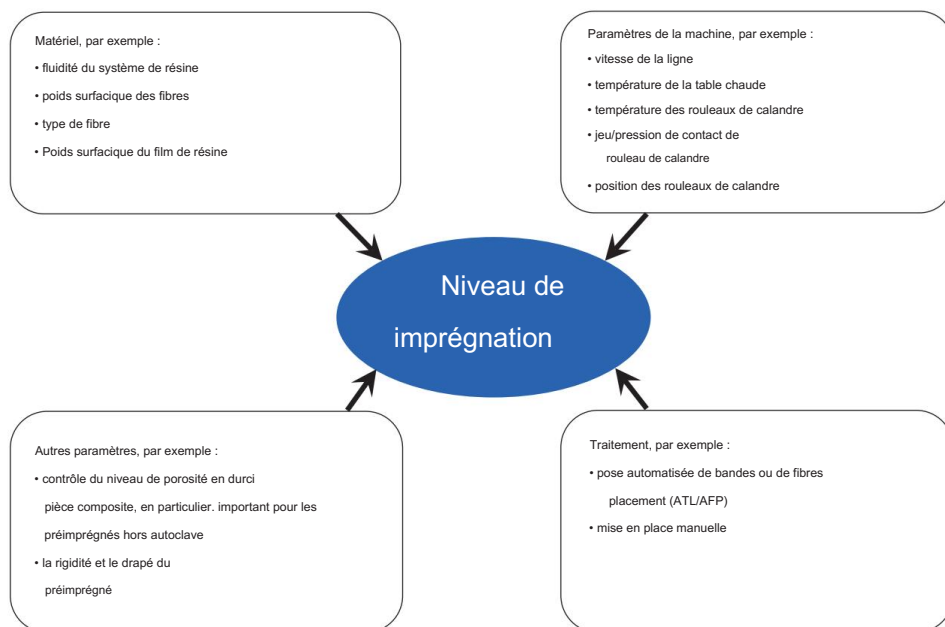


Figure 3.14 Exemples de paramètres et de contraintes influençant le niveau d'imprégnation dans les préimprégnés thermofusibles

Il n'est pas possible d'enregistrer le niveau d'imprégnation comme paramètre en ligne pendant le processus de fabrication du préimprégné. Par conséquent, la récupération de l'eau et d'autres méthodes sont souvent utilisées pour déterminer le niveau d'imprégnation (voir chapitre 7) et pour contrôler et gérer le processus d'imprégnation.

La figure 3.15 montre les bords coupés des préimprégnés avec différents degrés d'imprégnation (environ 6 % et 1 % de reprise d'eau). Ces soi-disant « images en fausses couleurs » attribuent une valeur de couleur à chaque valeur de gris dans une photographie en noir/blanc. Cette représentation des couleurs permet une détermination automatisée du niveau d'imprégnation par analyse photographique ainsi que l'établissement d'une corrélation avec les valeurs de rétention d'eau, facilitant ainsi une inspection simple et rapide pendant le traitement.

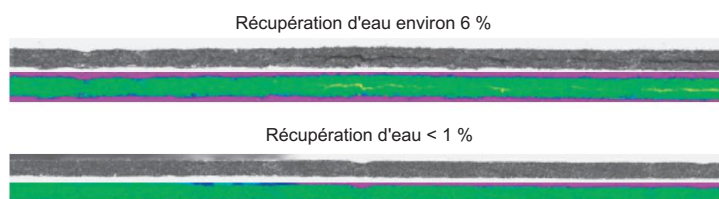


Figure 3.15 Bords coupés de préimprégnés avec différents niveaux d'imprégnation

Le niveau d'imprégnation affecte d'autres propriétés, telles que le drapé et le collant du préimprégné. À des degrés d'imprégnation plus élevés, le matériau non durci est plus rigide et diminue donc le drapé du matériau. À des niveaux d'imprégnation inférieurs, le matériau est plus doux au toucher et il est plus facile à draper, par ex. par exemple, sur les rayons. Les préimprégnés de deuxième génération sont souvent utilisés avec un léger excès de résine et le flux de résine est destiné à atteindre une teneur en volume de fibres spécifique dans le composant durci afin qu'un niveau d'imprégnation plus élevé puisse être défini. Dans les préimprégnés de 3ème génération, le pourcentage de résine est déjà réglé précisément pour atteindre la teneur volumique de fibres dans le composant durci (58 à 60 %). Ici, un niveau d'imprégnation inférieur est spécifiquement choisi pour garantir suffisamment de résine sur la surface de la fibre et donc une adhérence suffisante pour traitement ultérieur (Section 3.2.4.3 « Tack »).

La détermination de la composition exacte du produit est un processus itératif, car les différents paramètres sont interdépendants. En fin de compte, des facteurs tels que le processus de fabrication, les additifs utilisés pour la fabrication du composant final ainsi que la géométrie et la taille du composant ont une influence décisive sur le degré d'imprégnation souhaité.

3.2.4.3 Adhérence (adhésivité)

Le terme « collant » décrit la capacité de différentes couches de matériaux à adhérer les uns aux autres ou à la surface d'un moule. Cette propriété est requise pour la fabrication de matériaux composites afin d'éviter le glissement des plis individuels tout en facilitant le décollement pour les corrections nécessaires. Avec un tack élevé, les plis déplacés ne peuvent plus être décollés sans les détruire ; avec un faible collant, les plis peuvent glisser.

Il n'existe pas d'échelle standardisée pour le caractère collant d'un matériau en raison du large Il existe une grande variété de matériaux disponibles dans le commerce et il n'existe pas non plus de méthodes de test universelles. Le collant étant une propriété importante pour d'autres matériaux et produits semi-finis, tels que les revêtements, diverses méthodes et procédures de test, chacune limitée à une application très spécifique, ont été établies.

Comme le montre la figure 3.16, le collant des préimprégnés therm durcissables est déterminé par une variété de paramètres différents.

Il est évident que, contrairement au niveau d'imprégnation, le collant d'un matériau ne peut pas être facilement réglé ou contrôlé, mais est une propriété influencée par de multiples paramètres. De plus, ces paramètres s'influencent mutuellement, par ex. par exemple, le matériau de base et le processus de fabrication et/ou la stabilité au stockage, qui à leur tour affectent le traitement.

Les matières premières, telles que la base de résine et la teneur en modificateur du système de résine préimprégné, peuvent avoir une influence plus significative sur l'adhérence ultérieure d'un préimprégné. Le choix des matières premières est presque exclusivement déterminé par les exigences relatives aux propriétés à atteindre à l'état durci.

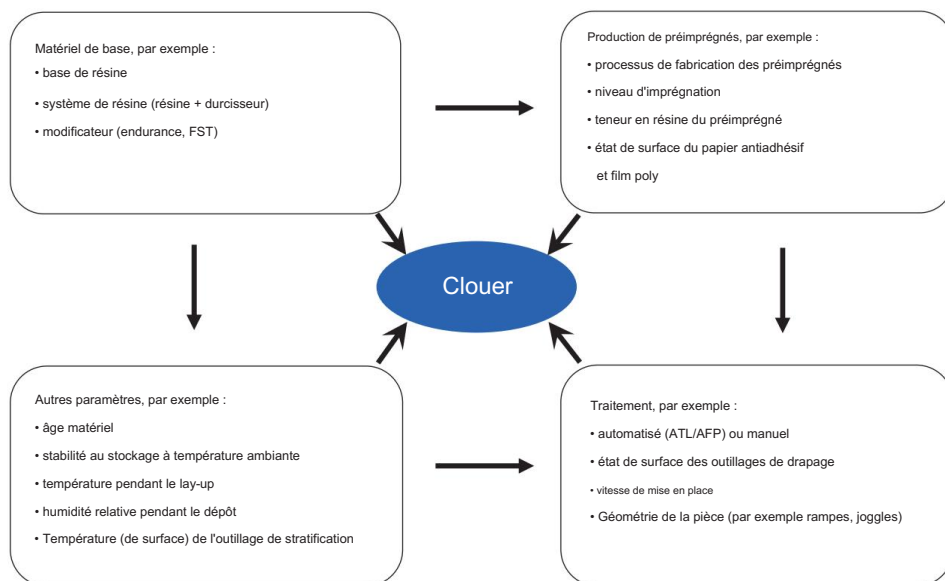


Figure 3.16 Exemples de paramètres affectant le pointage

Le processus utilisé pour fabriquer le préimprégné influence également son caractère collant, car la méthode de fabrication et l'application ultérieure entraînent de nombreux paramètres d'influence qui affectent le traitement ultérieur des matériaux préimprégnés. Il apparaît alors si le pouvoir collant du matériau est adapté à la méthode de traitement choisie. Si ce n'est pas le cas, des ajustements ne peuvent être effectués qu'au niveau de la méthode de traitement, car les propriétés des matériaux doivent répondre aux spécifications et ne doivent pas être modifiées. Des ajustements dans le processus de fabrication des préimprégnés nécessiteraient une requalification coûteuse du matériau. En particulier dans l'industrie aéronautique, les préimprégnés sont conçus pour répondre à des caractéristiques spécifiques, telles que la température de transition vitreuse, la ténacité et un écoulement de résine extrêmement faible.

Ces caractéristiques déterminent l'apparence et la transformabilité du matériau.

L'aptitude au traitement et le caractère collant du matériau préimprégné sont également affectés par la surface du moule et le taux de drapage.

Il convient également de prendre en compte les effets du vieillissement du matériau et des conditions ambiantes pendant le traitement (humidité relative et température). En particulier, l'âge d'un matériau préimprégné a une influence décisive sur son caractère collant [7].

Le transformateur doit prendre en compte une grande variété de paramètres qui affectent le traitement ainsi que les caractéristiques du matériau durci.

3.3 Références

- [1] A. Glawe, K. Timmermanns, R. Reuscher. Beschichtungs- und Verarbeitungstechnologien zur Herstellung von Prepreg-Produkten. Technische Textilien. 2008, 4, 174-175.
- [2] John W. Putnam, Brian S. Hyes, James C. Seferis. Analyse et mise à l'échelle des propriétés, de la structure et du processus des préimprégnés pour la fabrication et les performances. Journal des composites avancés. 1996, 47-57.
- [3] James C. Seferis, Roman W. Hillermeier, Frédéric U. Buehler. Préimprégnation et autoclavage de composites thermodurcis — Matériaux composites complets. (ISBN : 0-08 0429939). Tome 2 (ISBN : 0-080437206), 701-736.
- [4] Brochure d'entreprise : Prepreg Technologies. Composites Hexcel. 2012.
- [5] Composites haute performance : de l'art à la science : un aperçu des préimprégnés. 2000, mai/juin.
www.hpcomposites.com
- [6] K. Kawabe, H. Sasayama, S. Tomoda. Nouvelle technologie de remorquage en fibre de carbone et applications aux matériaux composites avancés. Journal SAMPÉ. 2009, 45, 6-17.
- [7] R. J. Crossley, P. J. Schubel, N. A. Warrior. Détermination expérimentale et contrôle du collant des préimprégnés pour la fabrication automatisée. Plastique, caoutchouc et composites. 2011, 40, 363-368.

4

Préimprégnés : traitement Technologie

Hauke Lengsfeld et Javier Lacalle

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrirons les différentes technologies utilisées pour traiter les pré-imprégnés et les transformer en composants pré-imprégnés. Nous présenterons les méthodes de dépôt manuelles et automatisées ainsi que les méthodes de découpe et de mise en forme de matériaux préimprégnés.

L'un des avantages des matériaux renforcés de fibres réside dans le fait que le renfort en fibres peut être placé stratégiquement dans le composant afin d'optimiser la relation entre les propriétés mécaniques et le poids.

Les méthodes de fabrication utilisant des préimprégnés sont particulièrement efficaces car elles permettent d'obtenir la plus haute qualité et le placement le plus précis des fibres dans le composant. Cela garantit également un contenu volumique optimal de fibres dans le composant, car le rapport résine/fibre a déjà été coordonné dans le préimprégné. La structure en couches peut être déposée manuellement ou par des processus automatisés.

En général, les procédés utilisés pour fabriquer des composites sont des procédés de stratification et de dépôt qui utilisent des produits plats et semi-finis (par exemple des préimprégnés) et les déposent dans une séquence spécifique et selon une orientation et une forme définies sur un moule ou un outil.

Aujourd'hui, il existe une grande variété de procédés disponibles. Il existe deux approches différentes pour classer ces processus. Premièrement, la prise en compte de la pression appliquée lors du formage et du durcissement conduit à la classification des processus les plus courants, comme le montre la figure 4.1 :

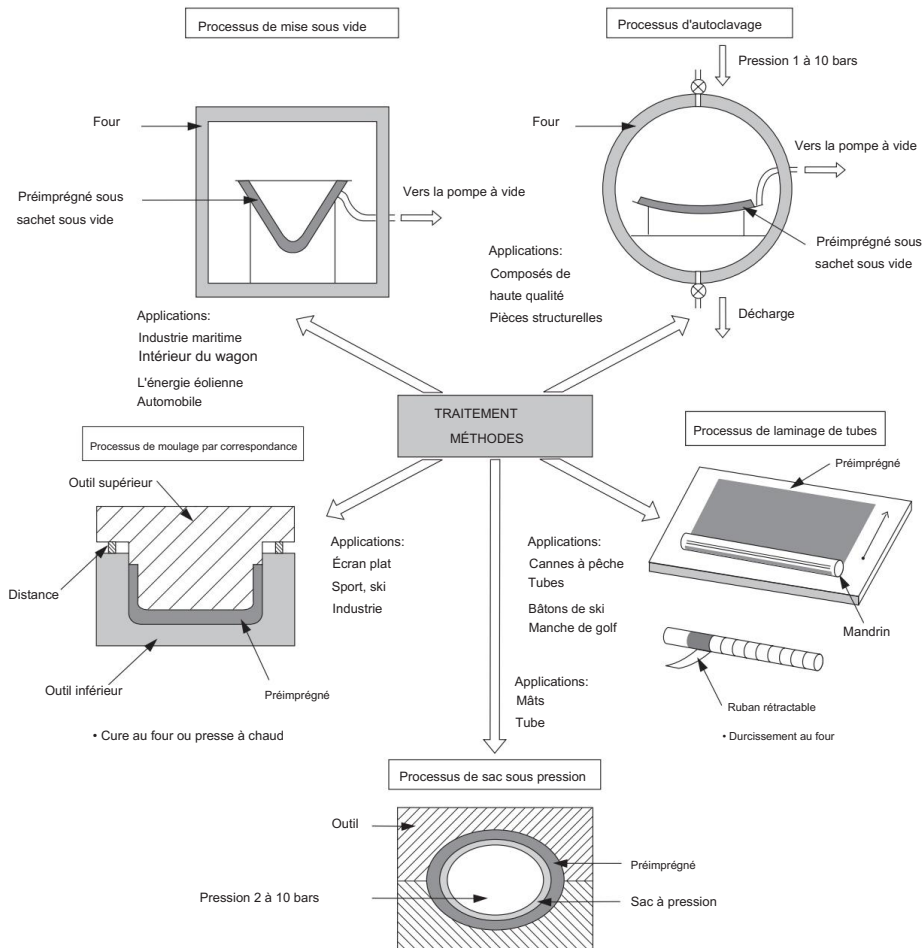


Figure 4.1 Processus de durcissement et de formage des préimprégnés [Autorisation : © Hexcel Corporation]

Une perspective alternative considère les technologies de dépôt et de traitement utilisées pour traiter les préimprégnés (Figure 4.2). Cette approche inclut également le processus ultérieur de fabrication d'une pièce composite renforcée par des fibres et fournit une classification différenciée selon les différentes technologies. Même si l'approche orientée pression (voir Figure 4.1) inclut souvent le processus de durcissement, elle est délibérément séparée des technologies de dépôt et de traitement. Le durcissement est considéré comme une étape distincte et inclut donc les processus de pression illustrés à la figure 4.1.

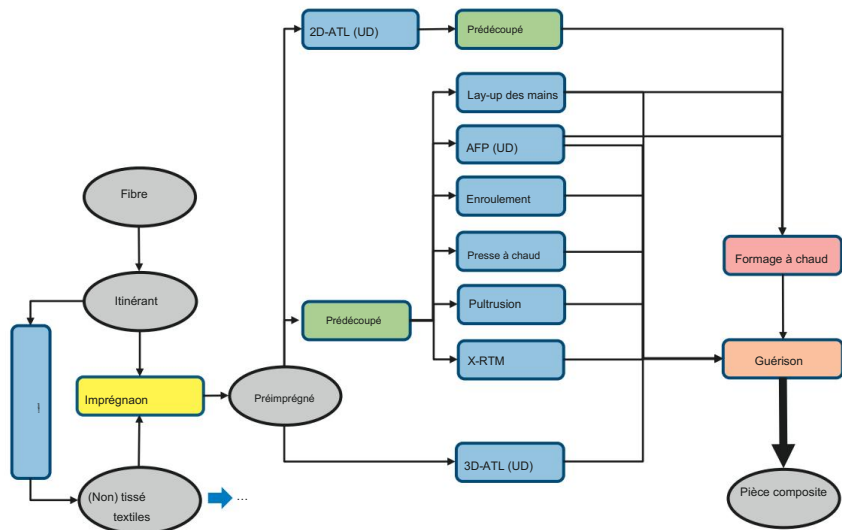


Figure 4.2 Technologies de dépôt et de traitement des préimprégnés

La figure 4.2 montre diverses technologies de traitement des matériaux préimprégnés. Toutes les technologies ne conviennent pas également à tous les types de préimprégnés. Par exemple, les tissus imprégnés de résine ne peuvent normalement pas être déposés à l'aide des technologies de traitement ATL ou AFP. En revanche, les préimprégnés UD peuvent être transformés en tapis ou en composants en utilisant n'importe quelle technologie de traitement disponible.

Le choix de différentes configurations de plis lors du dépôt permet de fabriquer des composants d'épaisseur et de structure variables. En général, chaque couche séparée (couche) peut présenter un contour et une orientation de fibre différents (Figure 4.3).

Dans ce qui suit, nous discuterons plus en détail des étapes de traitement illustrées dans la figure 4.2 à partir du moment où le préimprégné est fourni.

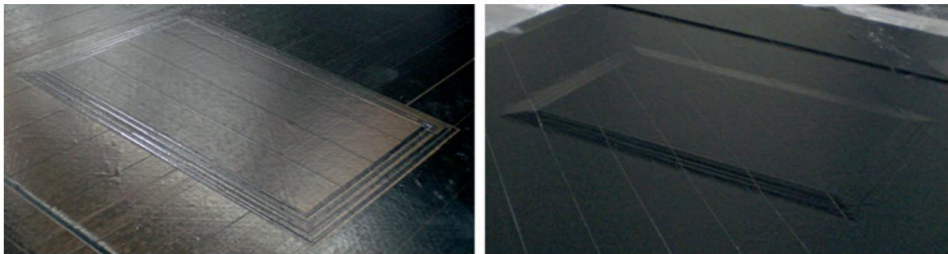


Figure 4.3 Stratifié constitué de couches découpées en forme nette (plis) (à gauche) et de dépôt ATL tridimensionnel (à droite)

4.2 Découpe des préimprégnés

Les préimprégnés sont disponibles dans le commerce en rouleaux (voir chapitres 2 et 3), et les largeurs des rouleaux peuvent varier considérablement en fonction du matériau et des exigences du client. Les rubans UD sont généralement fournis dans des largeurs de 150, 300, 600 et 1 200 mm, tandis que les préimprégnés en tissu sont disponibles dans des largeurs de 1 000 à 1 270 mm.

Avant la fabrication du composant final, le matériau doit être découpé pour correspondre à la géométrie souhaitée (voir Figure 4.2). Ici, on distingue deux grandes méthodes : la découpe manuelle ou les systèmes de découpe automatisés. Les pièces découpées sont souvent « assemblées » afin que plusieurs pièces allant ensemble puissent être emballées dans une seule boîte. Les différentes pièces découpées sont étiquetées afin de pouvoir être identifiées et traitées ultérieurement (soit via des systèmes informatiques, soit à l'aide de dessins). Étant donné que les préimprégnés n'ont qu'une durée de vie limitée (stockage ou traitement à température ambiante), les kits peuvent être congelés et traités ultérieurement. La découpe de couches ou de tissus de fibres de carbone incrustés de résine est relativement facile en raison de leur faible résistance au cisaillement et au flambage, ce qui constitue un avantage distinctif par rapport aux autres fibres. Cependant, le caractère abrasif des fibres de carbone provoque une usure des outils de coupe, notamment des outils non trempés.

4.2.1 Découpe manuelle

Pour les coupes manuelles, un couteau en acier (cutter, couteau Stanley) est tracé le long d'une barre de coupe droite ou le long d'un gabarit métallique pour les coupes profilées. La découpe manuelle est généralement utilisée pour des dimensions géométriques relativement petites ou lorsque le nombre de pièces découpées ne justifie pas l'automatisation. Cependant, l'efficacité et la précision de cette méthode dépendent de la précision dimensionnelle du gabarit ainsi que de l'expérience du personnel.

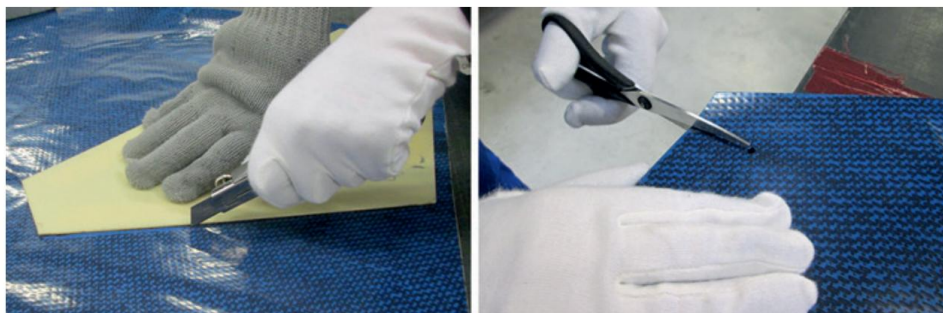


Figure 4.4 Coupe manuelle au cutter ou aux ciseaux

4.2.2 Découpe automatisée

Au début de la découpe automatisée des préimprégnés, des systèmes de découpe par ultrasons et par jet d'eau étaient utilisés. Aujourd'hui, ces derniers ne sont plus utilisés car l'humidité introduite dans le préimprégné par le jet d'eau provoquait souvent la formation de porosité lors du durcissement du composite. Dans les lignes de production modernes, la découpe automatisée est généralement réalisée par des découpeuses à ultrasons. Ce sont des machines contrôlées par ordinateur conçues pour couper des textiles et autres matériaux souples. Les premières découpeuses CNC ont été développées dans les années 1970 pour les applications textiles, puis optimisées pour la découpe de matériaux secs renforcés de fibres de verre et de fibres de carbone et préimprégnés.

Systèmes de découpe automatisés

En principe, une fraise se compose d'une table de coupe plane de taille variable (selon l'application) et d'un système XY traversant au-dessus (système de coordonnées cartésiennes) qui porte la tête de coupe (Figure 4.5). La trajectoire de coupe est générée par le mouvement superposé des deux axes. La tête de coupe peut également contenir un système d'étiquetage pour étiqueter chaque coupe et/ou une caméra pour contrôler la position correcte du matériau.

Le matériau est coupé par un couteau (Figure 4.6) qui est déplacé dans la position de travail appropriée le long de l'axe z. Une variété de couteaux différents est utilisée, par ex. par exemple, les molettes de coupe (motrices et non motorisées), les couteaux oscillants, les couteaux traînants et les couteaux à poinçonner. Certains fabricants actionnent leurs couteaux par ultrasons pour empêcher la lame de coller au matériau pré-imprégné et pour faciliter simultanément la coupe des fibres abrasives. Les coupes finies (Figure 4.7) sont retirées de la table de découpe soit manuellement, soit à l'aide d'une pince à vide et envoyées à l'étape de traitement suivante.



Figure 4.5 Systèmes de coupe [Autorisation : assyst Bullmer GmbH, Gunnar/Weissenberger AG]



Figure 4.6 Couteaux de coupe (couteaux trainants) [Autorisation : MUK GmbH Elmshorn (à gauche), assyst Bullmer GmbH (à droite)]



Figure 4.7 Coupe terminée

Le type de couteau choisi pour une application spécifique dépend du matériau à couper et de la géométrie de coupe. Des couteaux avec une géométrie de lame raide sont utilisés afin de produire un sac ou une ébauche de sac (voir Figure 4.8) sans couper le matériau restant ou au moins minimiser l'incision (Figure 4.8, à droite).

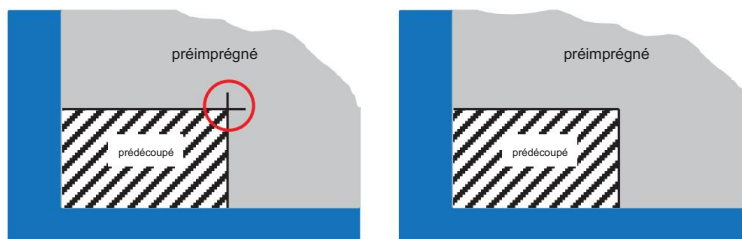


Figure 4.8 Découpe des flans de sacs à l'aide d'un couteau standard (à gauche) et d'un couteau spécial (à droite)

La table de découpe est généralement recouverte d'une surface de coupe constituée de feutre, de plastique ou de blocs de poils qui permettent à l'outil de coupe de pénétrer légèrement dans la surface de coupe, facilitant ainsi une coupe nette (voir Figure 4.9). Selon le modèle, la surface de coupe peut être fixée au plateau de la table ou elle peut prendre la forme d'une surface de transport qui transporte simultanément le matériau à couper. Dans les deux cas, la table sera également équipée d'un système d'aspiration sous vide. Pour les systèmes de découpe par convoyeur, la table de découpe est généralement étendue dans la direction du transport au-delà de la zone de travail de la tête de découpe pour faciliter le retrait des coupes finies (Figure 4.5). Un mécanisme de nettoyage de la bande transporteuse est généralement intégré à la table de découpe. Du côté de la table de découpe par lequel le matériau est introduit dans la zone de travail de la tête de découpe, des systèmes d'alimentation pour l'alimentation automatisée du matériau (soit à partir de rouleaux, soit à partir de feuilles) peuvent être intégrés.

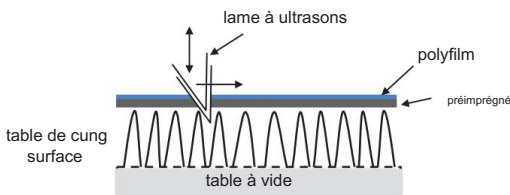


Figure 4.9 Surface de coupe (schéma)

La tête de coupe est positionnée sur l'axe y de l'entraînement, servant de porte-outil, généralement équipée d'un système de changement d'outil, maintenant simultanément plusieurs lames dans des supports à changement rapide. Les supports d'outils peuvent être équipés de commandes tangentielles pour permettre un contrôle actif de la lame pour le mouvement tangentiel à la direction de coupe. Les lames de coupe se sont avérées être le meilleur compromis lors de la découpe de matières textiles. Lors de la découpe de produits semi-finis renforcés de fibres, et en particulier de préimprégnés, l'utilisation de systèmes à jet d'eau et au laser doit être évitée en raison de l'introduction indésirable d'humidité et d'énergie thermique dans le matériau.

Nidification

L'utilisation de systèmes de découpe automatisés offre des avantages significatifs par rapport aux opérations de découpe manuelles tant en termes de précision dimensionnelle des coupes (plus grande précision) que d'utilisation maximale du matériau grâce à une imbrication optimale des coupes sur une largeur de matériau donnée. Cette imbrication (Figure 4.10) est souvent prise en charge par le logiciel CNC des systèmes de découpe. Les systèmes automatisés coupent généralement des préimprégnés monocouches (rubans et tissus UD), des piles de préimprégnés multicouches et des matériaux renforcés de fibres sèches (monocouches et multicouches).

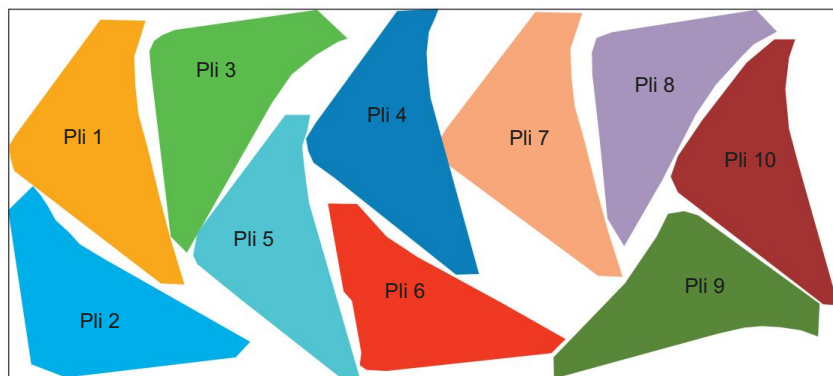


Figure 4.10 Motif d'imbrication sur une couche de tissu pour un découpeur CN

Les données CN requises pour la fraise sont dérivées d'un modèle de conception de pièces composites (CPD). À l'étape 1 (Figure 4.11), un « solide » du composant fini est conçu à l'aide d'un logiciel de CAO, tel que CATIA, sans définir les géométries des couches ni l'empilement. Cette étape définit la géométrie du composant souhaitée. À l'étape 2 (Figure 4.11), l'épaisseur et les limites d'un seul pli sont définies en découpant le solide par des plans séparés par l'épaisseur d'un seul pli. Cette étape définit les géométries et les contours monocouche.

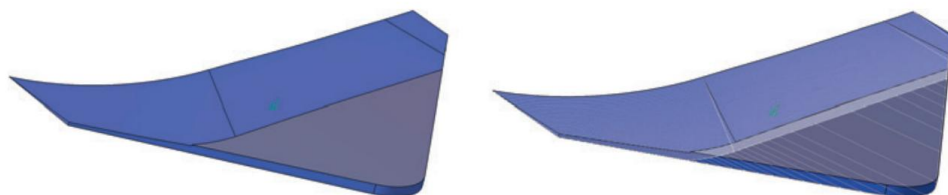


Figure 4.11 Étape 1 : solide ; Étape 2 : trancher [Autorisation : CTC GmbH]

Ensuite, l'orientation du pli souhaitée est attribuée à chaque géométrie de pli : 0° , 45° , 90° ou 135° .

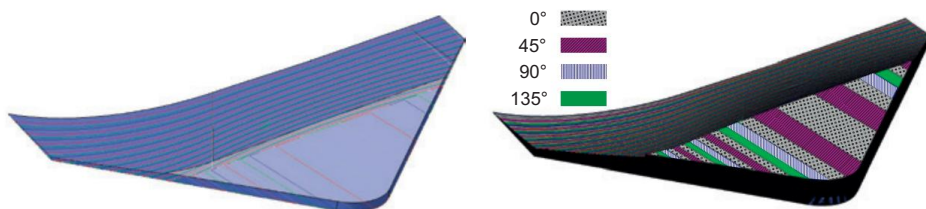


Figure 4.12 Orientation des plis et plis éclatés [Autorisation : CTC GmbH]

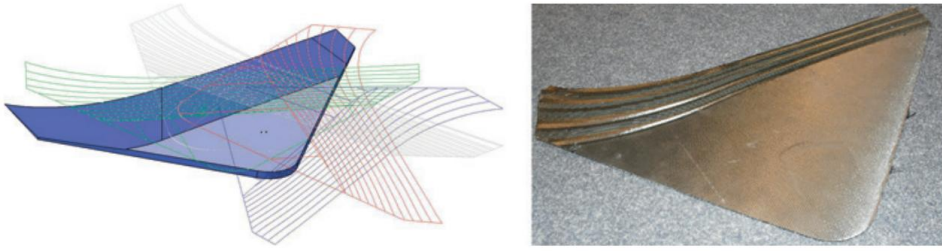


Figure 4.13 Vue développée des coupes de plis et de la coupe finie [Autorisation : CTC GmbH]

Les plis sont représentés sous forme de plis éclatés (Figure 4.12). Chaque surface colorée représente un pli. Ensuite, les géométries des plis sont transférées sur un plan afin de fabriquer les pièces découpées et les plis sont alignés en fonction de l'orientation des fibres. Enfin, les géométries sont exportées dans un format de données adapté aux découpeuses CN ou aux couches de ruban.

4.3 Stratification manuelle des préimprégnés

Le drapage manuel est le moyen le plus simple d'utiliser des préimprégnés et de produire un composant composite (voir également la figure 4.15). Ici, les coupes de préimprégnés (rubans ou tissus UD) sont empilées (laminées) sur un outil suivant un livre de plis qui précise exactement le nombre de plis et leurs angles. Ensuite, ils sont pressés ensemble pour obtenir une bonne liaison et éviter l'emprisonnement d'air.

Les matériaux préimprégnés sont livrés en rouleaux. Le préimprégné est déroulé avec le papier support et découpé manuellement à la forme exacte à l'aide d'un guide et d'un cutter. Cette étape du processus entraîne généralement des rebuts. Le papier support est retiré et le préimprégné découpé est positionné manuellement (parfois à l'aide d'outils auxiliaires) sur le composant à construire. L'adhésion initiale des couches doit toujours permettre l'élimination et la correction non destructives d'une couche mal positionnée. Cependant, cela dépend toujours du caractère collant du préimprégné utilisé (voir section 3.2.3). Le dépôt de la couche doit toujours s'effectuer lentement d'un côté, en étalant uniformément la couche pour éviter l'emprisonnement d'air. Le roulage peut être effectué à la main ; cependant, l'utilisation de rouleaux permet une consolidation plus uniforme. L'air emprisonné entre les couches peut être expulsé à l'aide d'un couteau à mastic en plastique ou en tapotant soigneusement le préimprégné avec une aiguille. Une autre option pour éliminer l'air et simultanément consolider la structure du préimprégné est l'application du vide. Ici, la structure préimprégnée est maintenue sous vide pendant env. 10 à 30 minutes à la fois à température ambiante. Cette séquence de traitement pour le dépôt d'une bande est représentée schématiquement sur la figure 4.14.

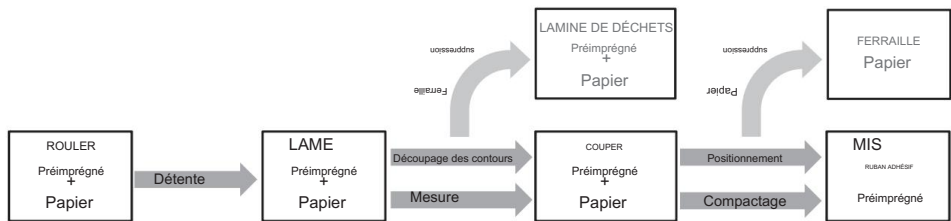


Figure 4.14 Séquence schématique pour le dépôt manuel d'une bande



Figure 4.15 Mise en place des mains : étapes du processus

De plus, le préimprégné peut être chauffé entre 50 et 60 °C afin d'abaisser la viscosité de la résine et ainsi soutenir le processus.

Le formage manuel est généralement utilisé pour des composants plus petits et/ou des pièces présentant des géométries/contours très sophistiqués qui ne peuvent pas être fabriqués de manière économique à l'aide de processus automatisés. Souvent, ces composants ou pièces de composants sont fabriqués à l'aide de préimprégnés de tissu car ils offrent un meilleur drapé que les rubans unidirectionnels. Actuellement, il n'existe aucun processus industriel automatisé pour le drapage des tissus préimprégnés ; cependant, il existe plusieurs procédés utilisant la technologie robotisée pour la manipulation automatisée des coupes de tissus secs.

En général, seules les structures préimprégnées multicouches relativement fines (environ 3 à 8 mm) peuvent être formées (à chaud) pour créer des contours tridimensionnels, car les structures préimprégnées multiaxiales sont généralement intrinsèquement plutôt stables. Il est difficile de former des structures préimprégnées avec des courbures serrées et/ou des compositions de plis complexes de manière fluide et sans plis, même lors de l'application de températures élevées pour diminuer la viscosité de la résine et améliorer le glissement interlaminaire. Le résultat est souvent une orientation/alignement perturbé des fibres.

Lors du drapage manuel, les coupes sont généralement alignées à l'aide de gabarits, de bords d'attaque ou de marquages sur le bord du moule pour obtenir une précision de dépôt suffisante (tolérance de position) des plis individuels et pour éviter un dépôt incorrect.

L'étiquetage direct des découpes finies lors de la découpe (qu'elle soit manuelle ou au cutter) évite l'échange des découpes lors du laminage. De plus, on utilise aujourd'hui des systèmes de positionnement laser qui projettent la position exacte et la forme des coupes individuelles sur la zone de drapage. Ces systèmes empêchent également le retournement des déblais et l'empilement dans la mauvaise orientation. L'inconvénient de l'utilisation de modèles devient apparent lorsque de nombreuses coupes de tailles différentes nécessitent le même nombre élevé de modèles.

Avec des coupes plus importantes, les modèles ont tendance à devenir plutôt lourds. Un autre problème lié au drapage manuel des découpes de préimprégnés est le grand nombre de découpes de préimprégnés nécessaires à la fabrication de composants complexes, qui peut atteindre plusieurs centaines. Cela entraîne un problème logistique supplémentaire, en particulier lorsque les coupes ne peuvent pas être stockées à température ambiante mais doivent être préparées et congelées pour être stockées.

Plusieurs paramètres, notamment la taille, la cadence de production ainsi que la précision et la répétabilité requises de la stratification du préimprégné (tolérances de forme et de position), déterminent si un composant sera fabriqué par stratification manuelle ou par un processus automatisé. D'une part, les processus de préparation manuelle nécessitent beaucoup de temps et de personnel ; d'un autre côté, il faut tenir compte des coûts élevés d'investissement et d'exploitation des processus automatisés.

Dans le passé (jusqu'en 2004 environ), les gros composants, tels que l'empennage vertical des Airbus A320 et A330, étaient fabriqués à la main à partir de bandes unidirectionnelles. Pour les composants de grande taille, la manipulation, le positionnement exact et la pose de longues coupes de préimprégnés sans emprisonner de l'air sont extrêmement difficiles, et les défauts dans la pièce composite sont donc difficiles à éviter. Par conséquent, la structure préimprégnée de composants aussi volumineux est généralement fabriquée à l'aide de systèmes automatisés.

4.4 Systèmes de pose automatisés : pose automatisée de bandes (ATL) et placement automatisé de fibres (AFP)

4.4.1 Présentation

Aujourd'hui, la pose automatisée de matériaux fibreux pré-imprégnés constitue une technologie clé pour la fabrication de grands composants composites dans l'industrie aérospatiale. Depuis plusieurs années, la pose automatisée de rubans est utilisée en conjonction avec d'autres technologies, telles que le formage à chaud, pour fabriquer des empennages verticaux, des structures d'ailes, des longerons, des longerons, etc. L'utilisation croissante de composants composites tant dans Les applications aérospatiales et automobiles, ainsi que la complexité croissante de ces composants, ont déclenché une croissance continue de l'utilisation et de la recherche de

technologies de pose automatisées et très efficaces. Les figures 4.16 et 4.17 montrent la complexité géométrique ainsi que la taille des pièces composites.

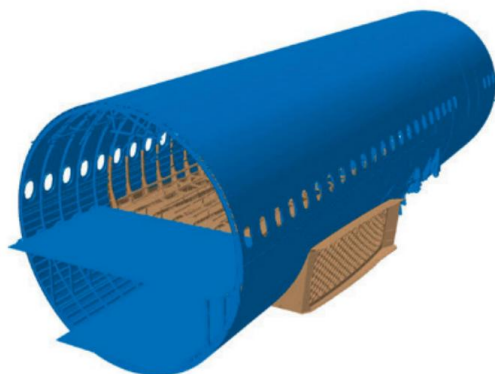


Figure 4.16 Structures de fuselage composites renforcées de fibres de carbone [Autorisation : Airbus Operations GmbH]

L'utilisation de systèmes automatisés de pose de bandes (ATL) et de placement de fibres (AFP) pour le traitement des bandes UD offre des avantages significatifs en matière de qualité et de productivité par rapport aux processus de pose manuelle :

- Positionnement des plis et répétabilité

- Taux de dépôt

- Pré-compactage uniforme et sans vides, etc.

Le drapage automatique par ATL et AFP est un procédé standard largement utilisé pour la production de grandes pièces dans l'industrie aéronautique, l'un des principaux clients des préimprégnés. Les deux technologies de drapage déposent des fibres continues imprégnées de résine sur la surface d'un outil ou d'un moule. Cependant, les deux procédés présentent des caractéristiques spécifiques qui les rendent parfaitement adaptés à diverses applications. Les critères de sélection d'un processus spécifique incluent la géométrie des composants et les exigences de fabrication telles que les suivantes :

- Courbure du composant

- Hauteur et pente des rampes

- Drapé matériel

- Outil positif ou négatif (masculin ou féminin), etc.

La technologie ATL est généralement utilisée pour les contours géométriquement simples, tels que les revêtements d'ailes et les volets, les panneaux pour les empennages verticaux et horizontaux, les stratifiés plats pour les composants formés à chaud, etc. Les technologies AFP sont préférées à l'ATL pour les géométries avec des sections à double courbure, et épaisseur de stratifié variable, comme les longerons et les panneaux de fuselage, etc., en raison de leur flexibilité supérieure.

Une grande variété de types de composants peuvent être déposés par des processus automatisés, un fait souligné par le développement continu de technologies de drapage nouvelles et avancées. Les types de composants standard pour les technologies ATL et AFP incluent, sans s'y limiter :

Panneaux et peaux : panneaux et stratifiés 2D, ainsi que panneaux de fuselage à double courbure, ailes, coques pour empennages horizontaux et verticaux, etc.

Composants fermés : segments de fuselage, cônes de queue, etc.

Espars, nervures, longerons, etc.

Il est évident que les processus de fabrication doivent répondre aux exigences de nombreux composants différents. Le défi majeur réside donc dans le développement et la mise en œuvre de systèmes et de technologies de stratification capables de reproduire chacune des différentes exigences de processus et de géométrie, allant des composants monolithiques aux structures sandwich.

Les propriétés mécaniques élevées requises pour les applications aérospatiales exigent une précision et une répétabilité tout aussi élevées du processus de superposition. La précision totale du positionnement volumétrique et du contour est généralement inférieure à $\pm 2,5$ mm sur toute la zone d'entreposage, qui peut atteindre une longueur de 30 m et une largeur de 8 m comme dans le cas du segment de fuselage ou du revêtement d'aile vu sur la figure 4.17.

Par rapport au drapage manuel, les technologies de drapage automatisé permettent des tolérances beaucoup plus étroites en termes de positionnement, d'espacement et de chevauchement des couches parallèles, ce qui se traduit par des propriétés mécaniques plus élevées. Dans le même temps, les technologies de drapage automatisées doivent répondre aux attentes générales en termes de productivité pour chaque type et taille de composant spécifique.

Actuellement, une grande variété de systèmes et de configurations de fabrication de préimprégnés sont disponibles. L'adaptation du système de fabrication et de la technologie de superposition aux composants spécifiques à produire est cruciale pour une productivité et une rentabilité adéquates. La productivité d'un système de fabrication dépend en grande partie de la géométrie et de la structure des couches du composant. Une configuration sous-optimale peut avoir de graves effets négatifs sur la productivité.

4.4.1.1 Objectif des processus de drapage automatisés

Bien que le processus manuel de drapage des préimprégnés décrit dans la section 4.3 soit simple et rentable en termes de matériaux et d'équipements auxiliaires, il présente également des inconvénients importants dans de nombreux processus industriels :

La productivité du procédé est très limitée et diminue encore davantage lors de la fabrication de composants complexes.

La précision de la structure stratifiée et la qualité des composants fabriqués sont relativement faibles et dépendent de l'expérience du personnel. Les processus qui nécessitent une grande précision nécessitent donc également un personnel hautement qualifié et

méthodes de test appropriées pour garantir une qualité optimale. En fonction des exigences de qualité, un processus manuel peut entraîner des taux élevés de pièces défectueuses/rebutées.

La taille des composants est très limitée et la norme de qualité requise ne peut permettre que la production de petits composants.

Les processus stables nécessitent des procédures reproductibles et traçables, dont aucune n'est offerte par les processus manuels.

L'objectif des processus automatisés est d'éviter ou de minimiser les inconvénients des méthodes de stratification manuelle mentionnées précédemment, afin que les caractéristiques positives de ces méthodes puissent toujours être utilisées pour un large éventail de pièces.

Les processus automatisés reposent sur une variété d'approximations et de principes de superposition. En particulier, les méthodes de fabrication employées dans l'industrie aéronautique peuvent être distinguées selon deux technologies majeures :

Pose automatisée de bandes (ATL, Figure 4.17 à gauche) et

Placement automatisé des fibres (AFP, Figure 4.17 à droite)

Dans les sections suivantes, nous présenterons les deux technologies, décrirons leurs caractéristiques et spécifications, et évaluerons leur utilisation dans diverses applications. Nous limiterons notre description aux procédés spécifiques aux matériaux thermoplastiques car ils représentent les méthodes établies dans l'industrie aéronautique. En général, il est possible de concevoir les technologies ATL et AFP pour s'adapter au traitement d'autres matériaux avec différents types de fibres et systèmes de matrice (par exemple, thermoplastiques, matériaux avec liants ajoutés ou textiles).



Figure 4.17 Processus de drapage automatisés : ATL (à gauche), AFP (à droite) [Autorisation : M.Torres Diseños Industriales S. A. U.]

4.4.1.2 Principales étapes du processus des technologies de superposition automatisée

Les principales étapes du processus des technologies de drapage automatisé, depuis le développement de la géométrie jusqu'au drapage final d'un composant et le traitement et la manipulation ultérieurs après le drapage, seront décrites dans cette section. Ces étapes générales se retrouvent dans toutes les principales technologies de superposition (par exemple ATL et AFP). Chaque méthode possède des propriétés spécifiques au processus qui seront discutées plus en détail dans les chapitres suivants.

Définition de la géométrie, compilation de livres de plis, modèle CAO et outils de mise en page

Contrairement à la fabrication de composants métalliques, les matériaux utilisés pour la production de composants renforcés de fibres ne présentent pas les propriétés mécaniques et physiques du matériau composite final. Au contraire, le composant renforcé de fibres atteint ses propriétés et sa forme finales après l'étape de durcissement. Cela entraîne une modification des propriétés du matériau et même une distorsion de la géométrie du composant par rapport à la géométrie avant durcissement. Ces effets (spring-in ou spring-out) doivent être pris en compte lors du développement de la géométrie, et la géométrie de superposition doit être adaptée pour que le composant durci et démoulé présente la géométrie finale souhaitée.

En gardant ces aspects à l'esprit, les composants sont fabriqués à l'aide de la technologie préimprégnée en déposant séquentiellement des couches préimprégnées individuelles avec des contours et des orientations de fibres différents.

Les propriétés de chaque couche de préimprégné sont définies de manière unique dans un livre de plis pour le processus de drapage. Le livre de plis est généralement fourni sous forme de modèle CAO (Figure 4.18) et peut être utilisé pour programmer des processus d'empilage automatiques. Il contient les informations suivantes :

- Numéro de pli et identification

- Contour du pli

- Matériel

- Surface du pli et côté de drapage et/ou orientation du drapé

- Définition de l'orientation des fibres et du système de coordonnées de référence

Généralement, des progiciels disponibles dans le commerce sont utilisés pour déterminer la géométrie et les surfaces des composants ainsi que pour compiler le livre de plis.

Programmation hors ligne, simulation de processus et programmation de machines

L'objectif du processus de drapage est de s'assurer que les surfaces et les contours définis dans le livre de plis sont entièrement recouverts de préimprégnés avec une orientation de fibres spécifique et selon des règles de conception spécifiques. Le drapage doit également minimiser les rebuts, être ajusté au contour théorique (en fonction des propriétés de la méthode de drapage) et être optimisé en termes de productivité et de qualité.

Un logiciel de programmation hors ligne est utilisé pour atteindre cet objectif. Ces produits logiciels graphiques permettent une génération conviviale de parcours et de stratégies de mise en page complexes. Outre les programmes disponibles dans le commerce, il existe également des programmes directement développés par les fabricants de machines et fournis spécifiquement pour correspondre à leurs systèmes (Figure 4.18).

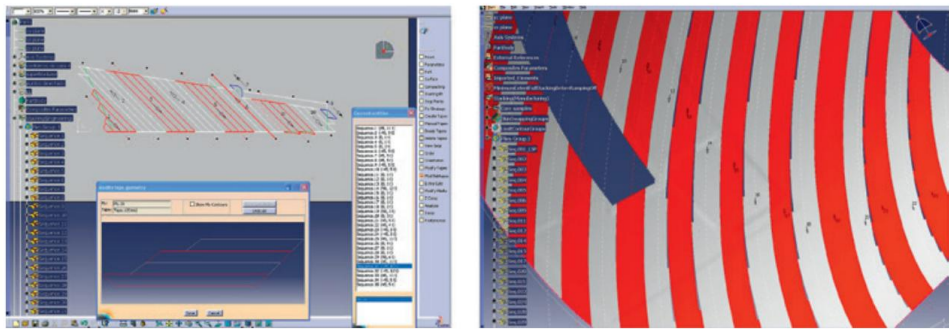


Figure 4.18 Exemple de structure de livre de plis avec séquence de plis, contour et orientation pour ATL (à gauche) et AFP (à droite) [Autorisation : M.Torres Diseños Industriales S. A. U.]

La phase de programmation prend en compte de nombreux paramètres et stratégies importants pour le processus de drapage ultérieur. Certaines de ces options incluent :

- Premier démarrage du drapage et échelonnement des plis

- Distance entre les bandes

- Stratégies de mise au rebut et de mise au rebut

- Ordre séquentiel et orientation des cours

- Contrôle des paramètres machine et process (pression, température, vitesse de drapage, compactage, tension du ruban, etc.)

- Génération de parcours, calcul et, si nécessaire, simulation de trajectoires (position et orientation du point central de l'outil), analyse de collision, détermination du positionnement synchrone de tous les axes de la machine et génération du programme pièce

- Autres options logicielles spécifiques à chaque configuration de machine et technologie de drapage

Les étapes de traitement sont simulées afin d'assurer la productibilité ainsi que d'éviter les défauts et les collisions entre la tête de la machine et le moule de superposition. Cette étape est particulièrement importante avec les systèmes employant des mécanismes cinématiques non cartésiens (par exemple, des robots), où le déplacement/le mouvement de la machine n'est pas intuitif et/ou n'est pas unique.

La configuration des différents paramètres et de la stratégie de stratification dépend fortement à la fois de la technologie de stratification choisie et de la géométrie des composants. Les possibilités offertes par le logiciel utilisé et les compétences du programmeur jouent également un rôle important. L'optimisation lors de la programmation de la machine a un impact majeur sur les éléments suivants :

- Productivité des machines

- Optimisation des rebuts

Qualité des composants et performances de drapage, en particulier pour les géométries complexes et le premier pli sur le moule (généralement avec un collant réduit)

Plis décalés sur l'épaisseur du composant

Les parcours et paramètres machine définis graphiquement par le logiciel hors ligne sont convertis par un post-processeur en commandes CNC, qui peuvent ensuite être interprétées et exécutées par une machine de drapage spécifique. Le programme machine généré (ou programme pièce) est importé dans le système de contrôle de la machine et exécuté via une interface homme-machine (IHM).

Positionnement et calibrage du moule

Lors de la génération et de la simulation du programme, le logiciel utilise des modèles de la machine, du moule et du composant qui représentent l'hypothèse d'une géométrie et d'une position idéales. Une fois transférés à une application réelle, il existe des différences en termes de géométrie et de position de chaque élément et dispositif dans la ligne de production qui sont créées par les tolérances définies pour la fabrication, l'assemblage et la ligne de production. Ces écarts entre modèle et réalité peuvent entraîner des problèmes de qualité, des non-conformités du composant et, dans le pire des cas, des collisions entre la machine et le moule.

Par conséquent, des procédures de mesure et d'étalonnage sont utilisées. Les positions des points d'outillage prédéterminés sur le moule sont mesurées et comparées aux valeurs théoriques idéales fournies par le modèle CAO. Une matrice de transformation peut être calculée et appliquée au programme pièce afin de garantir un dépôt de matériau précis et un fonctionnement sans panne.

Le processus de drapage et les étapes ultérieures du processus

Les programmes de drapage sont exécutés après calibrage du moule. Le processus et les paramètres de drapage dépendent fortement des différentes technologies de drapage. Par conséquent, les sections suivantes fourniront des détails explicites sur les processus de drapage ATL (Section 4.4.2) et AFP (Section 4.4.3).

Le résultat du processus de superposition est un composant optimisé et de haute qualité, positionné avec précision dans la zone de travail. Il est donc possible de tirer parti de l'infrastructure des équipements de dépôt pour effectuer les opérations post-dépose. Par exemple, des outils de coupe spécifiquement montés sur la tête peuvent être utilisés pour découper le contour du composant.

Cette approche offre plusieurs avantages, tels que la diminution des coûts des composants grâce à un investissement en capital et à un espace requis moindres, ainsi que l'utilisation de la même référence et de la même position pour plusieurs opérations, augmentant ainsi la stabilité du processus et réduisant et simplifiant la logistique du processus.

Pour les systèmes de fabrication de composites à haut débit, les équipements de drapage et de découpe peuvent également être installés en parallèle (Figure 4.19). Cela crée des zones séparées dans lesquelles le drapage et la découpe sont effectués simultanément au sein du même système.



Figure 4.19 Coupeuse parallèle et ATL avec système de changement de tête [Autorisation : M.Torres Diseños Industriales S. A. U.]

4.4.1.3 Préimprégnés pour les processus de superposition automatisés

Les préimprégnés unidirectionnels sont constitués de fibres orientées généralement entièrement imprégnées de résine. Pour les processus automatisés de l'industrie aéronautique, les préimprégnés avec des fibres de carbone unidirectionnelles et une résine thermodurcie (généralement époxy) sont à la pointe de la technologie.

Indépendamment des propriétés structurales ou liées au processus spécifiques, les principales caractéristiques des préimprégnés suivantes sont cruciales pour l'automatisation du processus de drapage :

Clouer

Le collant décrit la propriété d'un matériau préimprégné d'adhérer à un composant ou à un moule/forme existant et ainsi de maintenir une position et un drapé souhaités après le dépôt.

Le collant influence le processus de drapage de diverses manières, en fonction des matériaux et des surfaces rencontrés :

- Adhérence entre le préimprégné et le moule/forme (problèmes de premier pli)

- Tack entre préimprégné et plis déjà posés (composant)

- Coller entre le préimprégné et le papier (ATL) ou le film antiadhésif (AFP) avant le lay-up

- Adhérence entre le préimprégné et les éléments de guidage (par exemple, rouleau de compactage ou éléments de guidage dans la tête de superposition)

Comme décrit au chapitre 3, le collant est affecté par un certain nombre de facteurs (notamment la température, le compactage et la vitesse de drapage), qui ne peuvent être influencés que dans une certaine mesure au cours du processus. D'autres facteurs sont des caractéristiques strictement matérielles, qui ne peuvent être ajustées qu'au cours de la phase de développement du matériau.

Garantir un flux de processus précis peut nécessiter un ajustement du pouvoir collant du préimprégné pendant le cycle de processus (par exemple, pendant différentes étapes de guidage du matériau à travers la tête de superposition). Dans ce cas, la température est le paramètre le plus simple à contrôler. La modification de la température du préimprégné peut être utilisée pour réduire le collant du matériau pendant l'alimentation du matériau (refroidissement) ou pour augmenter le collant au point de dépôt (chauffage à l'aide d'une unité d'activation). La vitesse de dépôt et le degré de compactage influencent également le collant.

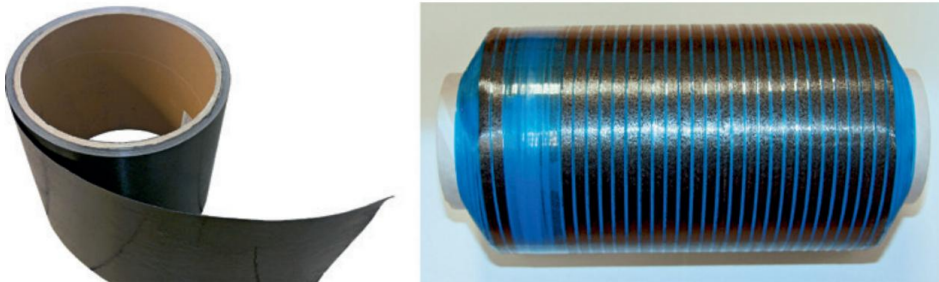


Figure 4.20 Matériel pour ATL (à gauche) et AFP (à droite)

Qualité de refendage

Les préimprégnés sont généralement fabriqués en rouleaux larges (rouleaux parents) qui sont ensuite coupés à la largeur souhaitée. La qualité, l'homogénéité et la propreté de ce processus de refendage sont cruciales pour une qualité de drapage optimale, notamment en raison des effets suivants :

Largeur de bande et homogénéité de la largeur : Les bandes ou les câbles présentant de fortes variations de largeur peuvent entraîner des chevauchements ou des espaces dans le stratifié ainsi que des instabilités du processus.

Propreté du bord coupé : pendant le processus de coupe, les filaments, les peluches ou l'accumulation de résine peuvent provoquer une contamination de la tête de superposition. Ceux-ci peuvent à leur tour non seulement perturber le processus de production, mais également se déposer sur le composant et ainsi causer des problèmes de qualité.

En général, les composants de haute qualité de l'industrie aéronautique nécessitent des tolérances de largeur de bande d'env. $\pm 0,125$ mm.

Imprégnation

Un mouillage adéquat des fibres pendant la fabrication du préimprégné n'est pas seulement important pour la répartition correcte de la résine pendant le durcissement. Le mouillage des fibres et la répartition de la résine ont également un impact sur le processus de drapage car ils influencent le collant, la qualité de coupe et la qualité du processus de coupe dans les processus ATL et AFP.

Rigidité et stabilité

La stabilité et la rigidité inhérente du matériau sont cruciales afin de guider avec précision le préimprégné à travers la machine et de le déposer correctement. La rigidité du préimprégné garantit qu'il conserve sa géométrie pendant toutes les étapes du processus de drapage. Une stabilité insuffisante du préimprégné peut entraîner une instabilité du processus et une réduction de la qualité du drapage.

La rigidité du préimprégné est particulièrement importante pour les processus ATL après la découpe et juste avant le drapage une fois le papier support retiré. Ici, une rigidité insuffisante peut provoquer des irrégularités lors du dépôt (Section 4.4.2.3).

Pour les procédés AFP, une rigidité et une stabilité suffisantes du préimprégné sont cruciales car ils sont traités sans papier support stabilisant (chapitre 4.4.3.3).

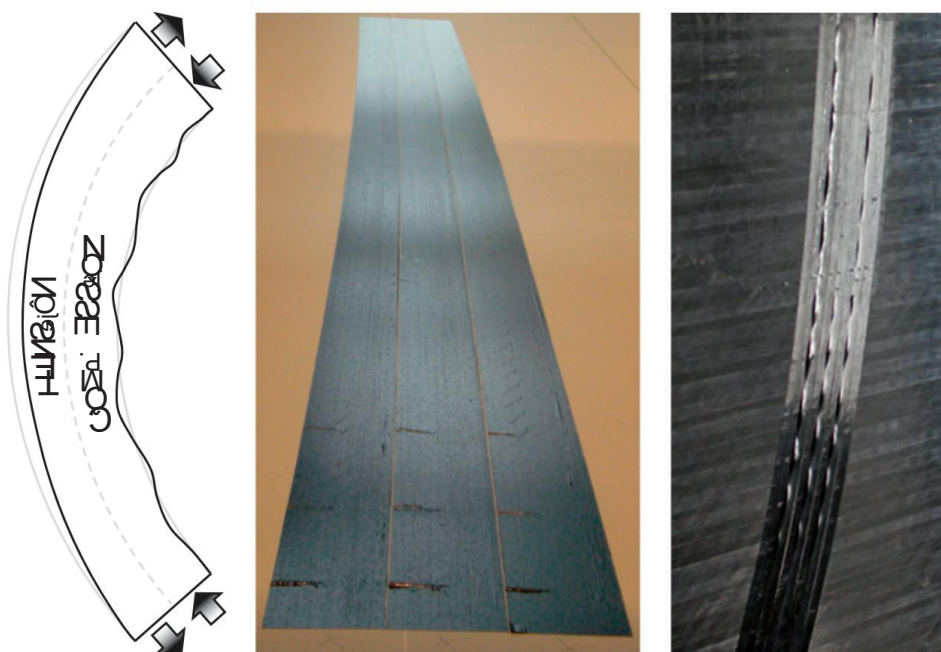


Figure 4.21 Schéma du principe de direction (à gauche), du lay-up ATL avec direction (au centre) et du lay-up AFP avec direction (à droite)

Drapabilité

La drapabilité d'un matériau en ruban décrit sa capacité à suivre les courbures dans le plan sans formation de boucles.

Lors de la pose (ou du drapage) de rubans préimprégnés le long d'une courbe (également appelée direction), les fibres sur les rayons extérieur et intérieur devraient être de longueurs différentes pour permettre une pièce composite exempte de contraintes résiduelles. En raison de la structure de l'université

le préimprégné directionnel et les fibres très rigides, qui ne permettent presque aucun allongement, le côté extérieur du câble est soumis à une contrainte de traction, tandis que le côté intérieur du rayon est soumis à une contrainte de compression. Par conséquent, et en raison de la moindre rigidité du préimprégné en dehors du plan, les contraintes résiduelles sont relâchées par la formation de boucles/rides sur le rayon intérieur (Figure 4.21) et par le levage de câbles sur le rayon extérieur. Les deux effets sont fortement influencés par le collant de la bande sur la pièce.

Cette caractéristique du préimprégné dépend principalement de la largeur du ruban, c'est-à-dire. par exemple, il est plus difficile d'obtenir un drapage sans boucle à mesure que la largeur du ruban augmente. Cependant, il est également influencé par d'autres paramètres du procédé tels que le collant, la température, le compactage et la vitesse de dépôt.

Les rubans préimprégnés plus étroits se drapent plus facilement que les rubans plus larges.

Par conséquent, des câbles très étroits sont utilisés pour la superposition de composants très courbés.

Largeur du ruban

La largeur de la bande a plusieurs effets opposés et constitue donc un facteur critique pour l'automatisation des processus de drapage. Les caractéristiques suivantes sont fortement influencées par la largeur du ruban :

Productivité : La technologie de superposition ainsi que la largeur totale de la superposition déterminent la productivité maximale réalisable.

Drapabilité du matériau : elle diminue considérablement avec l'augmentation de la largeur du ruban.

Flexibilité de la machine : Les machines pour des largeurs de ruban plus étroites sont moins limitées en termes de drapabilité du matériau et de largeur du système de compactage et sont donc capables de fabriquer des composants d'une plus grande complexité.

Déchets : Une bande plus large entraîne des taux de rebuts plus élevés, qui à leur tour dépendent également de la technologie de superposition.

Complexité de la machine : elle augmente avec le nombre croissant de sous-bandes ou de câbles.

Les préimprégnés sont disponibles en largeurs standard de 1/8", 1/4" et 1/2" (AFP), ainsi que 75, 150 et 300 mm (ATL).

Des configurations de têtes de superposition permettant la pose simultanée de plusieurs bandes sont également disponibles (à la fois pour les processus ATL et AFP) et peuvent être utilisées pour optimiser les caractéristiques répertoriées précédemment. Dans les configurations ATL-multi-bandes, les bandes individuelles sont également appelées sous-bandes. Ici, la largeur totale de la tête de superposition est déterminée par le nombre de sous-bandes et leur largeur (Figure 4.22).

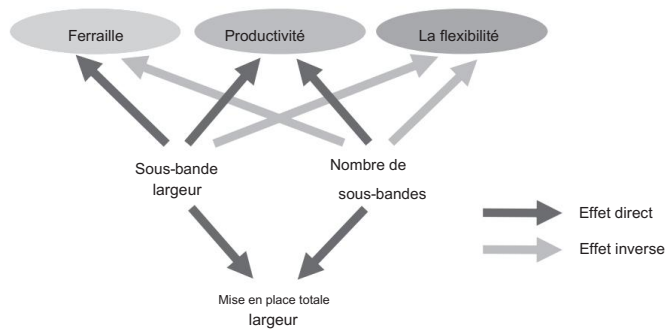


Figure 4.22 Effet de la largeur et du nombre de sous-bandes sur les caractéristiques de la cible

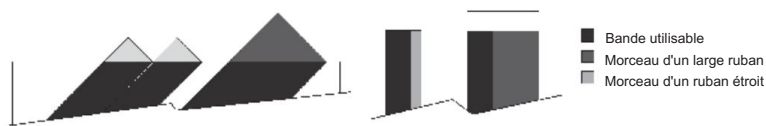


Figure 4.23 Exemples d'augmentation des rebuts avec l'utilisation de bandes plus larges

Films de sortie et de support

Les processus industriels utilisent des matériaux préimprégnés sous forme de rouleaux (pour l'ATL) ou de bobines (pour l'AFP) (Figure 4.20). Étant donné que les résines thermodurcissables standards sont collantes dans une certaine mesure à température ambiante, un papier ou un film antiadhésif est utilisé pour faciliter le déroulement des préimprégnés, sinon le ruban préimprégné adhérerait à lui-même. De plus, le film de démoulage peut jouer d'autres rôles importants, en fonction du processus de drapage utilisé (par exemple, dans les processus ATL, voir la section 4.4.2.2).

4.4.1.4 Architecture des machines

Une variété de configurations de machines peuvent être utilisées pour garantir la position spatiale et l'orientation correctes de la tête de superposition. Afin de positionner la tête de stratification perpendiculairement à la surface de stratification, six axes CNC sont généralement nécessaires (trois axes de translation et trois axes de rotation).

De manière générale, les architectures machines standards peuvent être utilisées pour tous les procédés de drapage, notamment AFP et ATL. Chaque configuration de machine présente des avantages et des inconvénients spécifiques qui doivent être pesés en fonction des exigences spécifiques de l'application et du processus. Les critères de sélection de la configuration de la machine sont les suivants :

Géométrie et taille du composant (dimensions et complexité de la pièce, composants 2D ou 3D, moule positif/négatif, rampes, etc.)

Besoin d'axes de positionnement supplémentaires (axe de rotation horizontale/verticale)

Taux de dépôt et productivité

Précision et répétabilité

Espace disponible

Investissement, coûts d'exploitation, etc.

Nous décrivons ensuite les configurations de machines particulièrement adaptées aux technologies ATL et AFP.

4.4.1.4.1 Configuration du portique

Cette configuration de machine consiste en une structure à portique se déplaçant dans le sens machine (longitudinal) sur des rails parallèles. Une barre de béliet montée sur le portique est capable de se déplacer dans les directions horizontale et verticale. Cette configuration permet un mouvement dans les trois directions de translation (Figure 4.24, a).

La tête de superposition est fixée à la barre de vérin via des axes CNC mécaniques rotatifs supplémentaires. Les axes de rotation déterminent l'orientation possible de la tête de drapage.

En fonction de l'application, de la complexité des composants et de la flexibilité souhaitée de la machine, un à trois axes de rotation sont requis en plus des trois axes de translation.

En général, six axes sont nécessaires pour les composants 3D très complexes (par exemple pour l'AFP), tandis que cinq à six axes suffisent pour les composants de complexité moyenne (par exemple pour l'ATL).

Les configurations à portique conviennent à la superposition de composants très longs et larges qui nécessitent une précision et une productivité maximales. Zones de travail dont les dimensions atteignent env. $50 \times 8 \times 2$ m peuvent être réalisés. Les machines de type portique associées à des outils fixes négatifs sont populaires dans l'industrie aéronautique pour le superposition de composants de grande taille. Les exemples incluent les revêtements d'ailes, les empennages verticaux et les sections de fuselage, etc. Il est également possible d'utiliser des machines de type portique pour le superposition sur des moules positifs ; cependant, cela nécessite généralement le positionnement d'un axe de rotation supplémentaire pour la tête de superposition.

En résumé, les machines de type portique fournissent des équipements flexibles pour la fabrication de composants de grande taille avec des exigences de qualité très élevées. Cependant, leur mise en œuvre nécessite un espace relativement grand et un pied de page solide (en raison des charges dynamiques élevées rencontrées), ce qui nécessite à son tour des coûts d'investissement accrus.

4.4.1.4.2 Configuration du pont

La machine de type pont est une alternative au type à portique. Il est constitué d'une poutre reposant sur des supports statiquement élevés des deux côtés. Les traces sur les supports facilitent le déplacement longitudinal de la poutre (Figure 4.24, b).

Ici, une attention particulière doit être accordée aux opérations de chargement des matériaux, car les supports verticaux fixes peuvent gêner le chargement latéral. Une fois qu'un concept de chargement de matériaux a été choisi, la configuration en pont peut permettre une dynamique de machine plus élevée dans le sens longitudinal que la configuration en portique.

le fait, en raison de sa masse mobile inférieure. Les mesures de sécurité sont également simplifiées car il n'y a aucune pièce mobile de la machine au niveau du sol.

4.4.1.4.3 Configuration des colonnes

La configuration de la colonne se compose d'une colonne sur rails longitudinaux. Une barre de béliet fixée horizontalement peut se déplacer dans les directions verticale et horizontale et est donc

capable d'effectuer les trois mouvements de translation fondamentaux. La tête de superposition est fixée à l'extrémité de la barre de vérin via des axes de rotation mécaniques CNC. Les axes de rotation déterminent l'orientation de la tête de drapage ; ils peuvent être configurés pour répondre aux exigences de l'application (Figure 4.24, c).

Les machines à colonnes sont compactes et facilitent la fabrication de composants longs et peu profonds. En général, ils sont particulièrement adaptés au drapage sur moules positifs (en combinaison avec des axes de rotation supplémentaires). Les exemples incluent des panneaux de fuselage positifs et même des sections complètes de fuselage.

Comme les machines de type portique, les configurations de colonnes offrent une précision et une répétabilité élevées et nécessitent généralement un pied de page.

4.4.1.4.4 Configuration en porte-à-faux

Les configurations en porte-à-faux consistent en une poutre horizontale se déplaçant sur un rail, sur laquelle une barre de vérin se déplace dans les directions verticale et horizontale (Figure 4.24, d). La tête de superposition est fixée à l'extrémité de la barre de vérin via des axes CNC de rotation mécaniques. Comme les autres configurations décrites ici, les machines de type cantilever sont capables d'effectuer chacun des trois mouvements de base de translation et de rotation.

La position de travail initiale de la tête d'empilage est verticale et, comme les machines de type portique, les machines de type cantilever permettent un déplacement très long mais pas très large ou vertical de la tête d'empilage. Cette configuration de machine offre une bonne précision de positionnement et une bonne qualité de drapage. En général, cela nécessite un pied de page machine.

Cette configuration de machine peut être utilisée pour des composants longs et étroits sur une table horizontale. Le cantilever nécessite moins d'espace que la machine de type portique ; cependant, hormis le portique, sa zone de travail est limitée.

4.4.1.4.5 Portique de table

En dehors des configurations détaillées ci-dessus, dans les machines de type portique de table, les rails de déplacement longitudinal ne sont pas fixés au sol mais directement sur la table de travail, ce qui limite la possibilité de fabriquer des pièces larges et très curvilignes.

Cependant, il présente l'avantage d'une configuration plus compacte et nécessite un pied de page plus petit (Figure 4.24, e).

En général, ces configurations de machines n'offrent pas les six degrés complets de liberté de mouvement, mais seulement quatre ou cinq, ce qui permet la superposition de pièces plates.

composants présentant de légères courbures et rampes. Il est également fréquemment utilisé pour les opérations de coupe avec une tête de coupe compacte à six degrés de liberté.

4.4.1.4.6 Configurations des robots

Contrairement aux configurations cartésiennes, spécifiquement adaptées aux exigences des processus ATL et AFP, les configurations robotisées pour la superposition de bandes ou le placement de fibres utilisent des robots industriels généraux (Figure 4.24, f). Cela permet des opérations flexibles et des acquisitions rentables. Cependant, en raison de la zone de fonctionnement limitée d'un robot, il peut être nécessaire de prévoir des axes supplémentaires (par exemple, un axe de rotation, un axe linéaire), ce qui entraîne à son tour des coûts d'investissement supplémentaires.

Les cinématiques standards des robots sont généralement conçues pour cibler des points. Contrairement aux machines cartésiennes, cela peut conduire à des imprécisions de positionnement et d'orientation lors d'une séquence de trajectoires de drapage définies. Afin d'augmenter la précision du drapage et ainsi de répondre aux exigences de précision, des systèmes supplémentaires ou des processus de mesure et d'alignement externes peuvent être mis en œuvre, ce qui augmente également l'investissement.

coût de mise en œuvre.

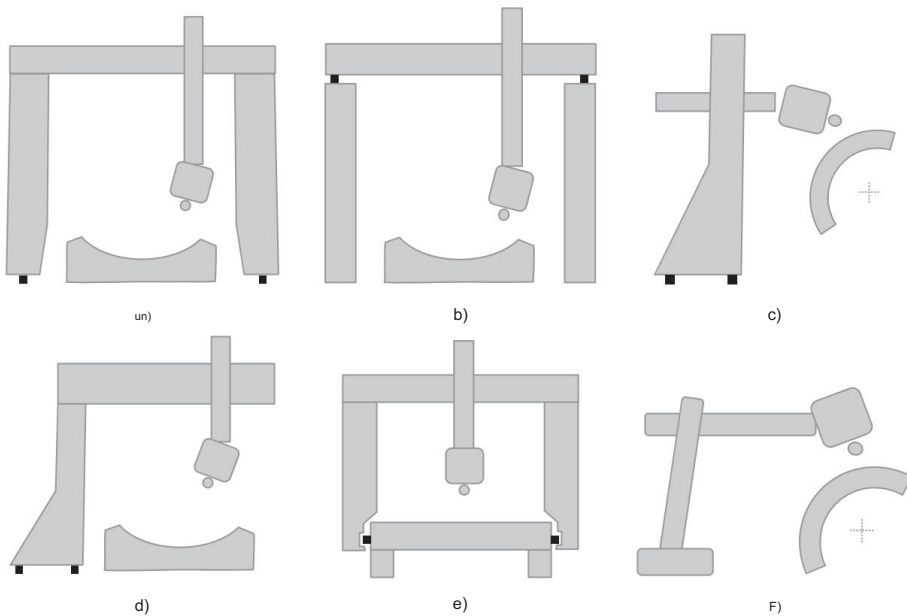


Figure 4.24 Schéma des configurations de machines courantes : a) portique, b) pont, c) colonne, d) porte-à-faux, e) portique de table, f) robot

4.4.2 Pose automatique de bande (ATL)

4.4.2.1 Introduction

La technologie de pose automatisée de bandes est basée sur le même principe que les méthodes de pose manuelle (Section 4.3) et utilise une pose automatisée séquentielle, en forme de filet, de larges bandes préimprégnées. Semblable aux matériaux pour les processus de stratification manuels, le matériau préimprégné est ici déposé sur des films de papier antiadhésif et enroulé sur des noyaux. Les principales étapes sont également assez similaires dans les deux procédés de fabrication.

Les caractéristiques fondamentales du processus ATL automatisé par rapport aux autres processus de drapage sont l'utilisation d'une ou plusieurs bandes larges et la possibilité de couper et de déposer avec précision les contours. Cela offre à son tour la possibilité de superposer n'importe quel contour sur le composant sans rebuts placés sur la pièce, ce qui constitue une différence significative par rapport aux autres processus (AFP). Cependant, la découpe nette de bandes larges peut entraîner des taux de rebut de bande relativement élevés, en fonction de la géométrie des composants.

Les procédés ATL sont utilisés pour la fabrication de gros composants présentant de légères courbures, tels que certains composants structurels primaires de l'industrie aéronautique (peints d'ailes, etc.).

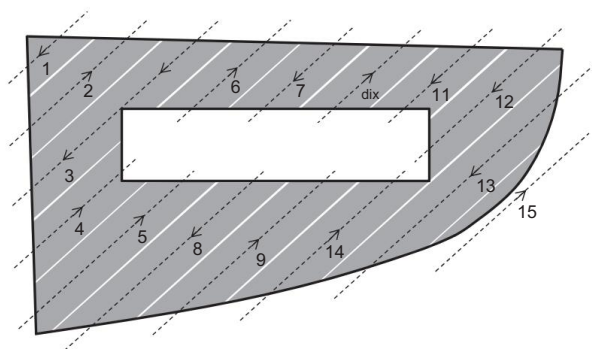


Figure 4.25 Exemple de séquence de parcours dans un lay-up ATL en forme de filet (à gauche) et une structure composite constituée de plusieurs plis ATL en forme de filet (à droite)

4.4.2.2 Matériaux préimprégnés pour ATL

En général, les processus ATL utilisent les mêmes formats de matériaux que les processus de drapage manuel (Section 4.3). En plus des caractéristiques communes des préimprégnés, qui influencent tous les processus automatisés (section 4.4.1.3), les processus ATL nécessitent certaines propriétés matérielles spécifiques.

Papier support : collage et libération

Le papier support est l'une des caractéristiques déterminantes des processus ATL.

Contrairement à d'autres procédés (par exemple AFP), le papier support permet ici des coupes en forme de filet. Les méthodes de découpe ATL n'endommagent pas le papier afin qu'il conserve sa fonction de support.

En raison de la fonction de support du papier lors du traitement et en particulier lors du processus de découpe, les propriétés mécaniques du papier, telles que la rigidité et la résistance à la déchirure, influencent considérablement la stabilité du processus.

Le pouvoir collant entre le papier et le préimprégné est une autre caractéristique importante du papier support. L'adhésion entre le papier et le préimprégné est essentielle car deux propriétés contradictoires sont recherchées simultanément. D'une part, le pouvoir collant et l'adhérence du papier support au préimprégné doivent être suffisants pour soutenir le préimprégné (lame), en particulier lorsqu'il est découpé. D'autre part, son adhérence doit être suffisamment faible pour que le papier support se détache facilement après la superposition. De plus, le papier support doit garantir que les feuilles n'adhèrent pas les unes aux autres sur le rouleau. Le papier support est donc couché sur les deux faces, mais avec des types et des quantités d'agent de démoulage différents. Le niveau de libération est une mesure du comportement d'adhésion ou de séparation/libération entre le papier et le préimprégné. Cette interaction entre le papier support et le matériau ATL est illustrée à la figure 4.26.

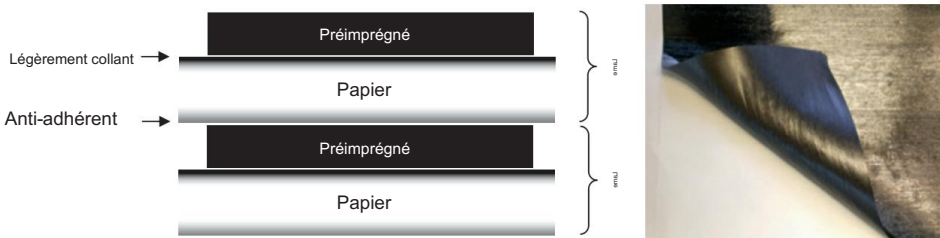


Figure 4.26 Effet adhésif et séparateur du papier dans les matériaux ATL (à gauche), feuille (à droite)

Largeur du ruban : drapabilité, productivité et rebut

Le choix de la largeur du ruban affecte simultanément la productivité, les rebuts et la drapabilité du matériau (Figure 4.22). Les rubans plus larges conviennent aux technologies ATL et sont disponibles en largeurs standard de 75, 150 et 300 mm. Bien qu'il soit possible d'utiliser des rubans plus étroits, cela réduirait la productivité.

En général, plusieurs bandes peuvent être utilisées simultanément, ce qui augmentera la productivité. Cependant, la complexité croissante du contrôle et la conception mécanique de la tête d'empilage limitent le nombre de bandes pouvant être superposées simultanément.

4.4.2.3 Principe général des processus ATL

Comme mentionné précédemment, les processus ATL automatisés sont basés sur des méthodes de superposition manuelle. Les séquences de processus des processus de drapage manuels (Figure 4.14) et automatisés ATL (Figure 4.27) comprennent essentiellement les mêmes étapes. Cependant, lors des processus ATL automatisés, plusieurs opérations/étapes sont non seulement automatisées, mais sont généralement effectuées en parallèle (mesure, découpe, séparation des déchets, séparation du papier, positionnement et compactage). Certaines étapes sont également adaptées au processus d'automatisation afin de faciliter un processus de drapage automatisé et continu. La figure 4.28 montre schématiquement la séquence complète du processus.

Les processus automatisés commencent avec le même matériau préimprégné enroulé sur un rouleau que les processus de drapage manuel (Figure 4.20). La longueur et la position précises du parcours sont mesurées en ligne pendant que le matériau est déroulé. Un système de découpe intégré est synchronisé avec le mouvement du ruban et de la machine et est capable de réaliser des coupes nettes dans le préimprégné sans endommager le papier support.

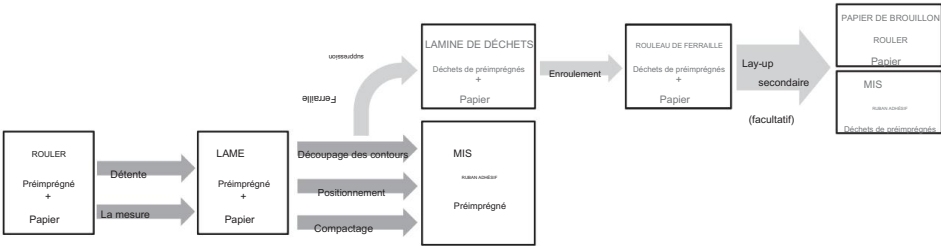


Figure 4.27 Séquence schématique des étapes du processus pendant la préparation ATL d'une couche de préimprégné

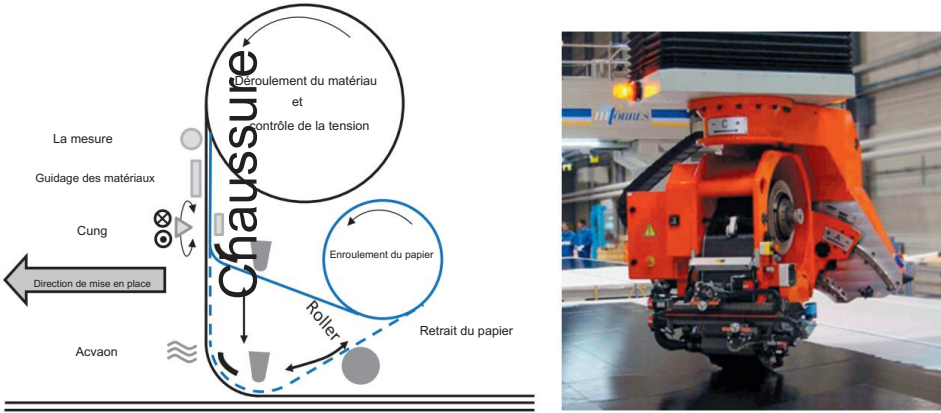


Figure 4.28 Schéma du principe ATL (à gauche) et de la tête de superposition ATL (à droite)
[Photographie gracieuseté : M.Torres Diseños Industriales S. A. U.]

La feuille se compose désormais du papier support non endommagé, du pré-imprégné découpé en forme de filet et des chutes. Dans les étapes suivantes du processus, le pré-imprégné découpé en forme nette est transporté jusqu'au point de superposition, puis placé sur le composant ou le moule et compacté en place. Ici, il est important de s'assurer que les déchets encore attachés au papier support y restent et n'entrent pas en contact avec le composant ou le moule. Ceci est accompli par des systèmes de compactage doubles qui doivent être utilisés pour réaliser des coupes complexes. La découpe du pré-imprégné doit présenter une certaine rigidité inhérente afin de garantir la précision du positionnement et la qualité du drapage.

Afin d'assurer une adhérence suffisante au début du parcours, la zone initiale (env. 100 à 300 mm, selon la largeur du ruban) est alimentée activement. Le papier support est ensuite séparé du pré-imprégné par le système de double compactage. Il permet un contact direct entre le rouleau de superposition et le pré-imprégné, facilitant la séparation du papier support du pré-imprégné et la prise simultanée du papier support.

Tant que la couche de pré-imprégné placée présente une adhésivité suffisante et que le papier support a été séparé du pré-imprégné, le matériau n'est plus alimenté activement, mais plutôt tiré passivement par le déplacement de la tête de superposition. Cela permet des opérations plus rapides pendant la mise en place.

A la fin du cours, la coupe finale de la forme du filet est préparée. Le système de coupe coupera le ruban en suivant le contour défini dans un mouvement synchronisé avec tous les autres axes contrôlés.

Les déchets générés peuvent être retirés avec le papier support et ensuite éliminés. Si cela n'est pas souhaité ou si cela interfère avec les étapes ultérieures du processus, les déchets peuvent également être déposés à l'extérieur du composant dans la zone de travail pendant le processus de superposition primaire. Les chutes qui ne peuvent pas être placées à l'extérieur du composant à la fin des couches peuvent être placées dans une zone de ferraille externe désignée lors d'un processus de superposition secondaire (Figure 4.29). Cette dernière option entraînera une réduction modérée de la productivité.

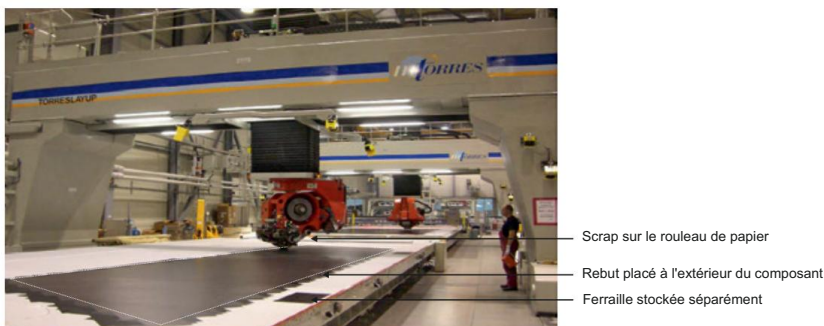


Figure 4.29 Option d'élimination des déchets : sur le rouleau de papier, à côté du composant ou dans une zone externe désignée [Autorisation : Airbus Operations GmbH]

Afin d'obtenir des processus hautement productifs et minimisant les rebuts, il est important d'adapter les séquences de cours. Avec une programmation appropriée, le montage final d'un cours peut être utilisé comme montage initial du cours suivant.

4.4.2.4 Technologie ATL et principaux sous-systèmes

Les processus ATL automatisés sont plutôt exigeants, tant sur le plan mécanique qu'en termes de technologie de contrôle. La condition préalable à un flux de production fluide est l'interaction optimale entre tous les sous-systèmes (Figure 4.28).

Système d'alimentation en matériaux

Le système d'alimentation en matériau fait tourner le rouleau de préimprégné pour alimenter le matériau, contrôle la tension du ruban, positionne avec précision le préimprégné et enroule le papier support. Les forces et moments provoqués par l'inertie du matériau et les charges dynamiques sont gérés par des axes CNC robustes. Cela inclut également des systèmes de mesure (généralement des encodeurs) qui contrôlent la position et la longueur exactes de la bande à un moment donné. Au cours des différentes phases du processus de superposition, le système d'alimentation en matériau est capable de déplacer le matériau de manière active et passive.

Système de guidage

Le système de guidage transporte le matériau depuis le rouleau de préimprégné, à travers le système de guidage et de coupe, jusqu'au rouleau d'empilage. Cela réduit ainsi la friction entre le matériau et les éléments de guidage et permet de compenser les écarts dans les bandes en bobine (par exemple, effets de télescope). Le système garantit également la position latérale correcte des bandes afin que des coupes et des drapages précis puissent être produits.

Système de coupe

L'une des caractéristiques les plus significatives du principe ATL est le fait qu'il offre la possibilité de superposer des contours complexes. Ceci est facilité par un système de découpe capable de réaliser avec précision des coupes nettes pendant l'empilage sans endommager le papier support. Différents fabricants proposent une variété de systèmes de coupe.

Découpe en ligne : représente le processus ATL commun utilisé pour réaliser des contours de découpe complexes lors de la superposition via plusieurs axes CNC. Ici, la position et l'angle des couteaux sont adaptés au déplacement du ruban. Afin de faciliter les coupes très complexes, certaines machines sont équipées de deux unités de coupe indépendantes qui exécutent les coupes en coopération. Ici, le rouleau préimprégné est chargé sur la tête de drapage sans conditionnement préalable. Cela garantit la stabilité du processus car cela permet un redémarrage et la répétition d'un arrêt à tout moment. La vitesse de coupe réduite diminuera légèrement la productivité. Les déchets restent sur le papier support et peuvent être éliminés de différentes manières (section 4.4.2.3).

Préparation du ruban : Les machines avec préparation du ruban (également appelées systèmes de pose de ruban en 2 étapes) sont équipées de systèmes de coupe plutôt simples qui permettent uniquement des coupes droites en ligne. Afin de stratifier des contours complexes, un deuxième rouleau préimprégné est découpé hors ligne suivant un programme de stratification spécifique. Sur ce deuxième rouleau, les couches complexes sont coupées séquentiellement et les chutes créées sont éliminées, réduisant ainsi le temps nécessaire à la découpe et à la récupération des chutes pendant le processus de superposition et augmentant ainsi la productivité. La relative instabilité du processus de drapage est un inconvénient de cette approche. Les coupes étant préparées à l'avance, la machine doit être arrêtée lorsqu'une coupe est mal préparée. De plus, la préparation avancée des bandes entraîne une augmentation des coûts et de la complexité logistiques.

Activation

Pendant le guidage du matériau, le collant doit être faible pour permettre une alimentation en douceur et une coupe sans problème. Cependant, l'adhérence au papier doit être suffisante pour garantir que le préimprégné reste sur le support pendant et après le processus de découpe.

En règle générale, le collant est contrôlé via l'activation de la température, sur la base du fait que l'adhérence augmente avec l'augmentation des températures. Les systèmes d'activation standard incluent l'air chauffé et l'infrarouge.

Étant donné que le collant doit répondre à des exigences opposées au cours des différentes phases et zones du processus de drapage, le contrôle du collant et de la température repose sur des compromis. Si l'activation du préimprégné est trop élevée, l'adhérence entre le préimprégné et le rouleau de superposition ainsi qu'entre le préimprégné et le papier support peut augmenter trop, entraînant une mauvaise séparation et d'éventuelles perturbations du processus. Si l'activation est trop faible, cela peut provoquer une libération indésirable du préimprégné du papier support ou une adhérence insuffisante du préimprégné au composant.

Compactage

Le système de compactage garantit que le matériau préimprégné est correctement positionné et compacté sur le composant ou le moule afin qu'une adhérence suffisante soit obtenue tout en empêchant la formation d'emprisonnement d'air/de vides. Ceci est particulièrement important et difficile lors de la fabrication de géométries complexes (par exemple, rampes, géométries à double courbure, petits rayons, etc.) ou lors de l'utilisation de rubans de grandes largeurs hors tout.

Généralement, le rouleau de compactage est constitué d'un matériau élastique capable d'absorber la courbure géométrique du composant/moule. Étant donné que le rouleau est en contact direct avec le préimprégné, il ne doit présenter qu'une adhérence minimale par rapport au préimprégné. Afin d'éliminer la contamination du préimprégné, le rouleau de compactage est composé de matériaux sans silicone.

Le système de compactage sépare également la coupe préimprégnée de la lame et la positionne avec précision sur le composant/moule. Pour les coupes complexes, un seul rouleau de compactage ne suffit pas ; ici, des systèmes doubles sont généralement utilisés.

4.4.2.5 Sélection de la configuration de la machine pour les processus ATL

La configuration globale de la machine ATL est définie à la fois par la tête de superposition et par la structure générale de la machine. Ces deux facteurs influencent considérablement les performances globales et doivent être adaptés l'un à l'autre ainsi qu'au composant à fabriquer afin d'optimiser le potentiel offert par les processus automatisés.

4.4.2.5.1 Architecture de machine pour les processus ATL

L'architecture de la machine détermine la taille maximale des composants, la complexité des composants pouvant être déposés, ainsi que la précision et le taux de dépôt du processus de drapage. Seules une sélection et une adaptation appropriées de la configuration de la machine pour correspondre à l'application spécifique permettent de maximiser les avantages offerts par les technologies de superposition.

La section 4.4.1.4 décrit en détail les configurations de machine les plus importantes. Dans ce qui suit, nous soulignerons certaines des caractéristiques distinctives des configurations ATL.

Configurations de portique/pont

Les machines à portique sont souvent la configuration de choix en raison de leur flexibilité et de leur haute précision. Ils sont populaires pour les composants de grande surface et à faible courbure construits sur des moules négatifs. Entre autres applications, les configurations de portique sont utilisées pour les empennages verticaux, les revêtements d'ailes et en général pour les composants 2D. En fonction de la géométrie des composants, des axes de rotation supplémentaires peuvent être implémentés afin d'augmenter la flexibilité et de répondre à la complexité des composants.

La technologie ATL est particulièrement adaptée aux courbures et complexités de composants faibles à moyennes ; ici, cinq axes CNC suffisent généralement. Les configurations de portique couramment disponibles sont équipées de cinq ou six axes CNC.

Configuration des colonnes

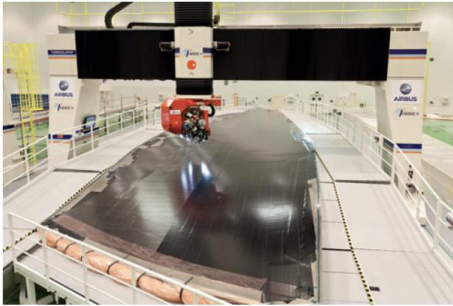
En raison de leurs têtes de superposition et de leurs rouleaux de matériau relativement lourds, ces configurations sont plutôt une exception parmi les configurations ATL. Néanmoins, ils sont techniquement réalisables et ont été mis en œuvre avec succès dans certaines applications.

Configuration en porte-à-faux

Les configurations en porte-à-faux conviennent mieux aux composants longs et étroits. Lorsqu'elle est utilisée pour des composants très larges, la conception en porte-à-faux, combinée au poids relativement élevé de la tête de superposition (y compris le matériau), peut affecter négativement la mécanique (statique/dynamique) de cette configuration.

Configuration du portique de table

Les configurations de portique de table ATL conviennent à la fabrication de composants longs, étroits et plats. Ici, les rails longitudinaux sont intégrés dans la table de superposition, donc le pied de page requis est petit et les coûts d'investissement respectifs sont moindres. Il est possible d'incorporer ces configurations dans des bâtiments existants avec des modifications structurelles minimales.



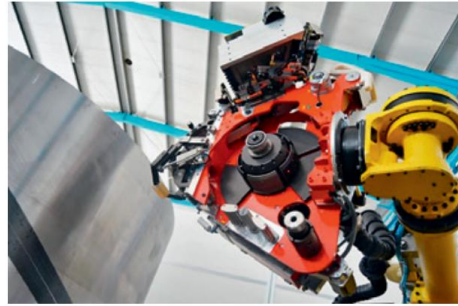
un)



)b



)c



)d

Figure 4.30 Configurations ATL : a) portique-ATL, b) pont-ATL, c) porte-à-faux-ATL et table de coupe à portique, d) robot-ATL [Autorisation : (a, c, d) M.Torres Diseños Industriales S. A. U. ; (b) Fives Forest-Liné]

Configurations des robots

Ces configurations conviennent à la fabrication flexible de composants de complexité moyenne à élevée. Ici, les avantages offerts par les technologies ATL, tels que la superposition de formes nettes, peuvent être exploités.

En général, les robots ATL utilisent des configurations à bande unique avec des bandes étroites (par exemple, 75 mm de largeur). Ces rubans sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant des exigences de direction plus élevées. Ils réduisent également le poids de la tête de superposition, un facteur important compte tenu de la capacité de charge limitée du robot.

4.4.2.5.2 Configuration de la tête de drapage ATL

Jusqu'à présent, nous avons décrit les principes fondamentaux et les principes directeurs des processus et sous-systèmes ATL. Cependant, la technologie ATL, comme toutes les autres technologies de fabrication de matériaux composites, est en constante évolution. Les fonctions nouvellement développées et les mises à niveau matérielles et logicielles permettent une productivité toujours croissante et l'utilisation de ces technologies pour des composants plus complexes.

Configuration de la tête de superposition

Les configurations ATL à bande unique représentent la norme industrielle actuelle et permettent la superposition de bandes individuelles. Généralement, les formats de ruban varient de 150 mm à 300 mm de largeur. Les configurations avec des exigences de direction élevées peuvent également utiliser des bandes plus étroites, par ex. par exemple, 75 mm.

Les configurations à bande unique offrent un haut degré de flexibilité. Cependant, le choix de la largeur du ruban implique un compromis en termes de productivité, de complexité des composants et de rebut. L'impact spécifique ne peut être évalué que dans le cadre d'une évaluation de l'utilisation prévue de la machine (Figure 4.31, a et b).

Les configurations ATL multi-bandes sont le résultat du développement continu des technologies ATL. Ils facilitent l'empilement simultané et net de plusieurs bandes étroites, surmontant ainsi les inconvénients des configurations ATL à bande unique, conduisant à une productivité plus élevée et à moins de rebuts. Ainsi, la technologie ATL multi-bandes représente une combinaison des avantages des processus ATL et AFP.

Les systèmes disponibles dans le commerce permettent généralement la superposition d'une (bande unique), de deux ou de quatre bandes (bandes multiples).

La configuration de la tête de superposition et la relation entre la largeur de la bande et le nombre de bandes déterminent la productivité, la flexibilité, la complexité maximale réalisable du composant et la quantité de rebut générée par la machine ATL (Figure 4.22). Les paramètres de configuration les plus importants sont les suivants :

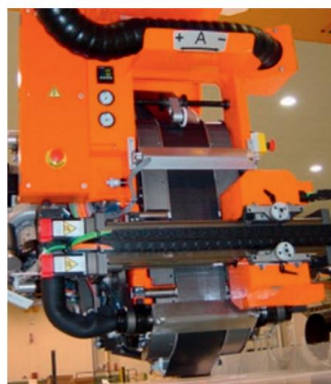
Largeur du ruban : des rubans plus larges augmentent non seulement la productivité et permettent une configuration simple de la machine, mais ils augmentent également la production de rebuts (Figure 4.23). La moindre drapabilité des bandes diminue la flexibilité nécessaire pour poser des géométries et des rampes complexes. Les largeurs de ruban courantes sont de 75 mm, 150 mm et 300 mm.

Nombre de bandes (ATL multi-bandes) : les applications ATL qui se concentrent sur une productivité, une flexibilité et un pilotage élevés ainsi que sur la réduction des déchets utilisent un nombre plus élevé de bandes, en général deux ou quatre. Une nouvelle augmentation du nombre de bandes augmenterait la complexité de la machine. Les configurations multi-bandes courantes incluent 2×75 mm, 4×75 mm, 2×300 mm et 4×150 mm ; ils obtiennent des résultats nettement améliorés par rapport à l'ATL à bande unique (1×75 mm, 1×150 mm ou 1×300 mm).

Largeur totale de la superposition : des combinaisons appropriées de nombre de bandes et de largeur permettent d'augmenter la largeur totale de la superposition et donc d'augmenter la productivité à taux de rebut constants. Par exemple, les configurations multi-bandes hautement productives (2×300 mm ou 4×150 mm) atteignent des largeurs totales de 600 mm, ce qui dépasse de loin la largeur standard de 300 mm pour les configurations à bande unique. Cependant, pour les composants présentant certaines courbures, la largeur correspondante du rouleau de compactage peut conduire à un compactage insuffisant (par exemple des rampes).

Les configurations multi-rubans d'une largeur totale de 300 mm (2×150 mm, 4×75 mm) sont généralement utilisées pour les composants présentant des courbures modérées et des exigences de productivité élevées avec de faibles taux de rebut, par ex. par exemple, revêtements d'ailes (Figure 4.31, c).

Des configurations multi-bandes hautement productives avec des largeurs totales de 600 mm (4×150 mm, 2×300 mm) sont utilisées pour les composants de grande surface avec des courbures relativement marginales et des exigences de productivité élevées, par ex. par exemple, stabilisateurs horizontaux (Figure 4.31, d).



a)



b)



c)



d)

Figure 4.31 Configurations des têtes de superposition : a) bande simple 1×150 mm, b) bande unique 1×300 mm, c) bande multiple 4×75 mm, d) bande multiple 4×150 mm [Autorisation : M. Torres Diseños Industriales S.A.U.]

Des configurations facultatives de têtes de superposition à changement rapide sont disponibles. Ils facilitent non seulement le remplacement rapide des matériaux, mais offrent également la possibilité d'optimiser la stratification de zones de composants spécifiques avec des exigences variables en utilisant des rubans de différentes largeurs (Figure 4.19).

La configuration de la tête de superposition doit être soigneusement sélectionnée et optimisée pour chaque application spécifique.

Technologie de superposition

Les technologies disponibles dans le commerce peuvent présenter des différences substantielles en termes d'avantages et d'inconvénients par rapport à une application spécifique. Par conséquent, une analyse minutieuse est nécessaire pour identifier la technologie la mieux adaptée à une application donnée. Les critères suivants doivent être pris en compte lors de la sélection d'une technologie ATL :

Production planifiée : L'identification et la définition précises des composants à construire, de leurs géométries, des exigences à respecter en termes de productivité et de qualité, des matériaux préimprégnés à utiliser, ainsi que de toutes autres conditions pertinentes sont essentielles à la réalisation d'un produit adapté et solide. sélection de la technologie ATL optimale pour une application donnée.

Structure de la machine : Détermination de la configuration appropriée de la machine et du nombre optimal d'axes principaux (linéaires et rotatifs). Les configurations de machines à quatre axes principaux sont utilisées pour les superpositions à plat sans possibilité de superposer des rampes prononcées. Cinq axes CNC permettent une fonctionnalité 3D complète. La gamme complète de six axes CNC permet à la tête de superposition d'être positionnée en continu perpendiculairement à la surface (composant/moule). Cette option n'est nécessaire que pour les composants extrêmement complexes, pour lesquels la technologie ATL n'est généralement pas utilisée.

Configuration de la tête de superposition : choix entre des configurations à une ou plusieurs bandes, et option de système de tête de superposition à changement rapide.

Système de découpe : utilisation de systèmes de découpe en ligne flexibles, fiables mais chronophages, ou de configurations de préparation de bandes plus productives mais plus coûteuses et moins stables.

Autres options : D'autres options et systèmes peuvent souvent être implémentés dans la tête de drapage. Ils offrent des fonctionnalités supplémentaires pour l'assurance qualité, l'amélioration de la stabilité des processus ou l'augmentation de la productivité, à la fois pendant le processus de superposition et tout au long du processus de production.

Systèmes de découpe de contour : Des systèmes de découpe supplémentaires facilitent le détournement du composant superposé jusqu'à son contour final. Ils réduisent considérablement les investissements en capital, les besoins en espace et la logistique, et conduisent à une amélioration de la qualité car la préparation et le détournement des composants s'effectuent dans des références de machine et des conditions de positionnement des composants identiques (Figure 4.19).

Étiquetage des composants, marquage des contours et contrôle laser du contour : facilite l'étiquetage et/ou la projection laser du contour du pli sur le moule. Souvent utilisé pour l'identification des coupes, pour le positionnement de plis manuels, ou pour le contrôle des contours de drapage et de coupe.

Coûts : les investissements en capital (coûts des machines, de l'infrastructure et des pieds de page) ainsi que les coûts opérationnels et les systèmes supplémentaires doivent être pris en compte en termes de productivité et d'utilisation des machines.

Selon la demande, des critères supplémentaires peuvent devoir être pris en compte.

4.4.3 Placement automatique des fibres (AFP)

4.4.3.1 Introduction

La technologie de placement automatique des fibres repose sur la superposition de câbles étroits posés simultanément et indépendamment les uns des autres. Ils peuvent être coupés par une coupe droite et transversale. Ainsi, le préimprégné n'est pas placé en forme de filet, mais plutôt en forme proche du filet (Figure 4.32). Chaque câble, ainsi que sa position et sa longueur, peuvent être contrôlés individuellement, de sorte qu'il n'y ait pratiquement aucune longueur excessive au niveau des bords des composants, ce qui réduit les rebuts à presque zéro. Afin d'atteindre une productivité élevée, jusqu'à 32 câbles parallèles sont placés simultanément. Ici, les principes de fonctionnement sont entièrement différents de ceux des méthodes de pose manuelle ou de pose automatisée de bandes (Section 4.4.2), qui déposent précisément des bandes plus larges en suivant un contour donné.

Alors que la drapabilité des rubans préimprégnés dépend de leur largeur respective, les câbles étroits utilisés pour les procédés AFP augmentent la drapabilité du matériau et facilitent ainsi la fabrication de composants 3D très complexes. De plus, les processus AFP réduisent les rebuts car les câbles individuels sont contrôlés et coupés avec précision.

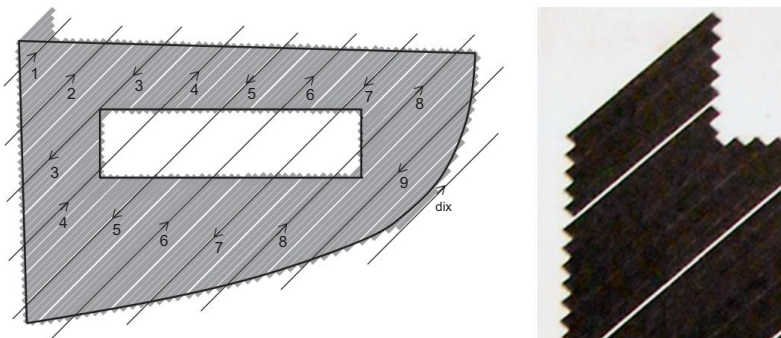


Figure 4.32 Exemple de contour de pli et de séquence de couches avec AFP (à gauche), drapage en AFP avec motifs de coupe typiques et longueur de drapage minimale (à droite) [Autorisation : à droite - Fraunhofer Institut für chemische Technologie, ICT-FIL]

Autrefois, la technologie AFP se caractérisait par des vitesses réduites lors de la découpe ou lors du réglage de la configuration. Aujourd'hui, de nouveaux développements, tels que la découpe et l'ajout à des taux de superposition complets (ce que l'on appelle couper/ajouter à la volée), ont ouvert toute une série de nouvelles opportunités et conduit à des augmentations significatives de productivité.

4.4.3.2 Matériaux préimprégnés pour AFP

Les processus AFP utilisent des bandes préimprégnées fendues, qui sont des câbles de fibres étroits de largeurs standard de 3,175 mm (1/8"), 6,35 mm (1/4") et 12,7 mm (1/2") qui sont fabriqués par fendre une bande mère. Semblables aux bandes ATL, les bandes fendues sont disponibles en épaisseurs monocouche de 0,125 mm (134 g/m²), 0,184 mm (194 g/m²) et 0,25 mm (268 g/m²), selon l'application. Ces câbles de fibres sont également coupés à des largeurs spécifiques (refendage) par des couteaux rotatifs à partir de bandes dites mères et ensuite enroulés sur des bobines plus petites de 3 kg, 7 kg ou 11 kg.

En plus des caractéristiques générales des préimprégnés thermodurcis pour tous les procédés automatisés mentionnés à la section 4.4.1.3, les procédés AFP nécessitent des propriétés matérielles importantes spécifiques à ces procédés.

Film de démoulage en plastique

En général, le traitement des bandes fendues ne nécessite pas de matériau support. Cependant, les préimprégnés thermodurcis pour les procédés AFP sont pourvus d'un film plastique antiadhésif, par ex. par exemple, un film PE (Figure 4.33). Il empêche le matériau thermodurci, collant à température ambiante, de coller sur lui-même. Contrairement aux procédés ATL, le film antiadhésif ne joue pas ici le rôle de matériau de support ; il est directement retiré dans le cantre et le matériau est introduit dans la machine sans films supplémentaires. Le mécanisme d'alimentation du câble est souvent refroidi afin de réduire l'adhérence du matériau à travers les éléments de la machine.

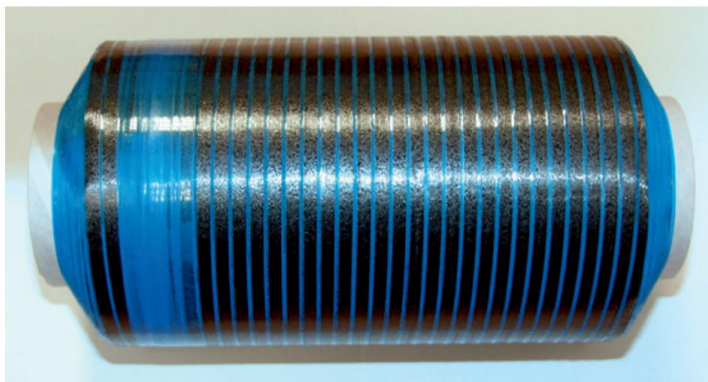


Figure 4.33 Ruban fendu (6,35 mm) sur bobine

Clouer

Le caractère collant du matériau préimprégné est encore plus important pour les technologies AFP que pour les procédés ATL, car les géométries des composants AFP sont souvent complexes (où la direction crée une tension interne plus élevée) ou les câbles doivent être posés sur des composants qui tournent autour d'un axe, sur lequel les bandes sont soumises à la gravité.

Le premier pli est particulièrement critique.

L'adhésivité du matériau peut être contrôlée par la sélection ciblée de la température d'activation, du compactage et du taux de drapage. Dans des cas extrêmes et pour des applications spécifiques, l'utilisation de films adhésifs peut s'avérer nécessaire.

Largeur de remorquage : productivité, drapabilité et rebut

La drapabilité d'un matériau préimprégné ne dépend pas seulement de sa composition (fibres et résines) et des paramètres du procédé (compactage, température, taux de drapage), mais avant tout de sa largeur. Par conséquent, l'utilisation de formats d'étoupe plus larges conduit à une réduction de la drapabilité et donc de la flexibilité du processus, car une drapabilité moindre réduit la complexité des composants. Cela crée également des taux de rebut plus élevés (figure 4.23).

Les têtes de placement de fibres pour les processus AFP utilisent généralement des câbles avec des largeurs standard de 1/8" (3,175 mm), 1/4" (6,35 mm) et 1/2" (12,7 mm), et un nombre standardisé de câbles (8, 16, 24 ou 32).

Qualité de refendage

Au cours des processus AFP, un grand nombre de câbles sont combinés et le respect des tolérances de largeur de bande est donc essentiel afin d'éviter les espaces et les chevauchements.

Les composants de haute qualité de l'industrie aéronautique permettent généralement des tolérances de largeur de bande de $\pm 0,125$ mm. Une bonne qualité de découpe conduit à une propreté accrue du guidage du ruban.

4.4.3.3 Principe directeur des processus AFP

Les processus AFP automatisés déposent simultanément plusieurs câbles étroits et pré-imprégnés les uns à côté des autres. Les traits individuels sont contrôlés indépendamment afin de pouvoir être démarrés et coupés selon les besoins (Figure 4.32). Le processus complet est schématisé dans la figure 4.34.

Le matériau préimprégné est fourni sur des bobines placées sur le cantre. Les bobines sont déroulées au fur et à mesure que les câbles sont déroulés et que le film antiadhésif est retiré.

Ensuite, les câbles sont guidés à travers la machine jusqu'à la tête de placement sous tension de câble contrôlée.

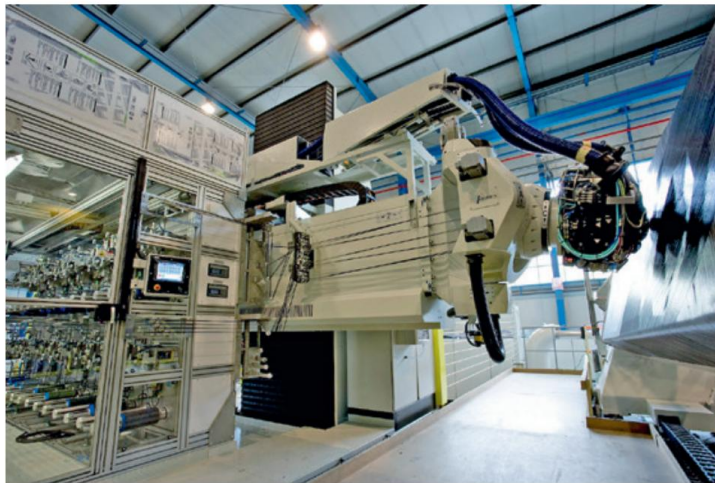
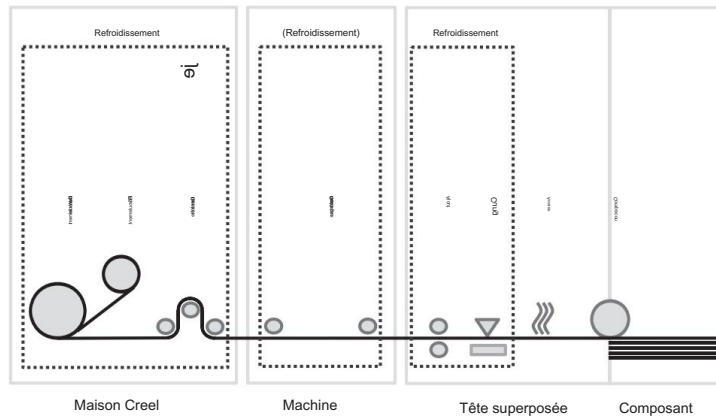


Figure 4.34 Représentation schématique des sous-processus AFP et de leur position dans la ligne AFP (en haut) et la ligne de traitement AFP typique (en bas) [Autorisation : M.Torres Diseños Industriales S. A. U.]

Le matériau thermodurci étant collant à température ambiante, il peut être nécessaire de refroidir les éléments de guidage du câble. Le système de refroidissement réduit le collant du préimprégné et permet ainsi une meilleure alimentation du matériau à travers la machine et réduit la contamination et l'accumulation de résine/fibre.

Dans la tête de placement de fibres, les câbles individuels peuvent être alimentés activement si nécessaire. De plus, les câbles sont coupés transversalement par un système de coupe intégré et contrôlé par CNC. Immédiatement avant le désarmement, les câbles sont déposés en parallèle. Afin de garantir une adhérence adéquate du préimprégné sur le composant, un système d'activation augmente la température du préimprégné (et/ou de la surface du composant). Ensuite, les câbles sont posés à l'aide d'un rouleau de compactage et drapés sur la surface du composant ou du moule (Figure 4.35). Une certaine rigidité inhérente du matériau est nécessaire pour guider les câbles dans la bonne position sous le rouleau.

Toutes les étapes d'automatisation, le positionnement et le mouvement synchronisé de tous les axes CNC font partie du programme de la machine et sont contrôlés par une CNC/PLC. Les fabricants individuels de machines AFP proposent des solutions et des sous-processus exclusifs (dont certains sont brevetés), ce qui peut donner lieu à des processus légèrement différents par rapport au processus général décrit ici. Des détails supplémentaires concernant les sous-systèmes mentionnés peuvent être trouvés dans la section 4.4.3.4.



Graphique 4.35

Dépôt parallèle de câbles, activation et compactage [Autorisation : Fraunhofer Institut für chemische Technologie, ICT-FIL]

4.4.3.4 Technologie AFP et sous-systèmes concernés

La sélection et l'optimisation de la configuration de la machine sont cruciales pour atteindre le niveau souhaité de qualité et de productivité des composants. Les facteurs les plus influents à prendre en compte lors de la sélection d'une configuration de machine sont le choix de la technologie et de la configuration de la tête de placement ainsi que l'architecture globale de la machine. Dans un scénario optimal, ils seraient sélectionnés pour le composant spécifique à construire.

Cantre : déroulement du matériau, retrait du film antiadhésif et contrôle de la tension

Les bobines de matériau sont stockées dans le cantre, qui est généralement refroidi pour maintenir un faible pouvoir collant et améliorer la durée de vie du matériau. Les bobines sont entraînées individuellement pour maintenir la longueur de câble et la tension exactes requises pour le processus d'enroulement à tout moment. Pour y parvenir, les bobines sont équipées d'un contrôleur de tension de remorquage qui permet un état contrôlé de la tension de remorquage dans la machine et donc un réglage précis.

le flux de processus, qui à son tour influence positivement la qualité du drapage et la stabilité du processus. De plus, le cantre contient un système qui retire le film antiadhésif des câbles. Ce système peut enrouler, aspirer ou déchiqueter le film séparateur.

Le cantre peut être placé dans différentes positions ; cependant, la taille et le poids du système sont des facteurs limitants. Il faut trouver un compromis entre la complexité du guidage jusqu'à ce que les câbles atteignent la tête de placement et les interférences géométriques et l'inertie du cantre. Si le cantre est placé à une plus grande distance de la tête de placement, le guidage du matériau devient plus complexe. D'un autre côté, c'est

les déplacements et l'inertie sont réduits. Si le cantre est placé près de la tête de placement, le guidage devient plus facile ; cependant, cela entraîne de l'inertie, des charges dynamiques et des structures plus grandes.

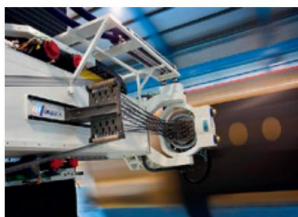
Le cantre peut également être directement connecté à la tête de placement. Ici, la distance entre le cantre et la tête de placement est petite, constante et indépendante du déplacement de la machine. Cela simplifie considérablement la conception du système de guidage et facilite la conception des configurations de changement de tête, permettant ainsi des changements rapides de matériau et de configurations de tête (nombre de câbles et largeur). Cette configuration est particulièrement intéressante pour les applications de production en grand volume et de complexité de stratifié très variable. Cependant, la structure du cantre lourde et plutôt volumineuse, qui est désormais directement fixée à la tête de placement, peut entraîner des limitations géométriques, qui à leur tour peuvent affecter la productivité ou interférer avec la capacité de produire certains composants.

Il est également possible de placer deux jeux de matériaux sur le cantre. Un autocollateur

Le système s'épisse et passe automatiquement de l'ensemble vide au nouveau une fois que le premier est épuisé. Cette option est particulièrement intéressante pour les productions en grand volume afin de minimiser le temps de chargement des matériaux.

Système de guidage des matériaux

Le système de guidage du matériau entraîne les câbles, sans film séparateur, depuis le cantre, en passant par la tête de placement, jusqu'au rouleau d'empilage. En général, le système de guidage du matériau est constitué de poulies de guidage ou de guides tubulaires, qui compensent le mouvement relatif et les rotations de la tête de placement par rapport au cantre (Figure 4.36). Ici, l'objectif est d'éviter le rembobinage des bobines provoqué par le mouvement de traction de la machine, qui créerait des instabilités du processus.



un)



b)



c)

Figure 4.36 Cantre et systèmes d'alimentation : a) par poulies de guidage, b) par guides tubulaires, c) cantre et système d'alimentation au niveau de la tête de placement [Autorisation : (a, c) M. Torres Diseños Industriales S. A. U. ; (b) Coriolis Composites S.A.S.]

De plus, les câbles doivent être alimentés régulièrement afin d'éviter toute torsion du câble. Ceci est particulièrement important pour les matériaux ayant une rigidité intrinsèque relativement faible. Un certain niveau de rigidité intrinsèque est nécessaire, non seulement pour garantir un passage précis

la machine, mais aussi pour positionner correctement les câbles de la tête de placement sur le rouleau, car après leur sortie de la tête de placement, les câbles sont acheminés vers le rouleau de compactage sans aucun élément de guidage mécanique.

Refroidissement

Si nécessaire, le matériau peut être refroidi activement via le système de guidage. Le système de refroidissement réduit le collant du préimprégné et facilite ainsi une meilleure alimentation du matériau, une propreté améliorée du guidage du ruban et une plus grande stabilité du processus. Ceci est obligatoire pour les systèmes à guidage tubulaire fermé, dans lesquels les pré-imprégnés et le système de guidage partagent de grandes surfaces de contact.

Système d'alimentation

L'alimentation du matériau pendant le processus de superposition passe d'active à passive. Au début du cours, le matériau doit être alimenté activement jusqu'à ce qu'il soit en contact avec le composant et qu'une longueur minimale soit déposée afin qu'une adhérence suffisante entre le câble et le composant soit obtenue. Par la suite, le pouvoir collant du matériau déjà déposé est capable de vaincre la tension du ruban et le matériau est simplement tiré par le déplacement de la machine. Ainsi, le matériau est transporté passivement. En général, les systèmes d'alimentation actifs sont basés sur des éléments rotatifs qui permettent le transport indépendant et contrôlé de câbles individuels.

Le contrôle de la position et la précision du système d'alimentation affectent la précision de la mise en place lors de l'ajout de câbles. Ceci est particulièrement critique à des taux de dépôt élevés, lorsqu'une technologie d'alimentation et un contrôle imprécis peuvent créer des tolérances inacceptables.

Système de coupe

Le système de coupe est crucial pour la productivité globale et la précision de la superposition. Ici, les différences entre les technologies AFP individuelles sont significatives, dues aux approches différentes (généralement brevetées) des fabricants de machines.

Les systèmes de découpe de pointe pour les processus industriels AFP utilisant des matériaux thermodurcissables utilisent des coupes droites – transversales à l'orientation des fibres – pour chaque câble individuel. Le résultat est le motif typique des stratifiés AFP (voir Figure 4.32). Les découpes très complexes, telles que celles qui peuvent être réalisées grâce aux technologies ATL, ne peuvent pas être réalisées, car le matériau n'est pas soutenu par du papier support lors de la découpe. Ainsi, seule une forme proche du filet, et non une superposition de forme nette, est possible. L'écart entre le lay-up théorique et réel dépend de la largeur du remorquage.

Les conceptions et les routines de contrôle définies par les fabricants de machines influencent de manière significative les principales caractéristiques du système de coupe, notamment la longueur minimale de superposition, la vitesse de coupe maximale et la longueur de redémarrage de la coupe une fois le câble coupé.

La longueur minimale de drapage est déterminée par la distance mécanique entre le système de coupe et le point de drapage. Selon la technologie, cette longueur peut varier entre env. 90 et 140 mm et influence l'adaptation du drapage ultérieur au contour théorique, en particulier pour les contours complexes. Les contours très étroits et/ou comportant des coins ne peuvent être posés qu'en posant des ferrailles (Figure 4.32). Si possible, les déchets doivent être positionnés à l'extérieur du composant. Cependant, le dépôt de ferraille à l'intérieur du composant est parfois inévitable.

La vitesse de coupe maximale est un critère critique déterminant la productivité de la technologie AFP. Des principes de coupe simples, comme le principe de la guillotine [3], nécessitent des vitesses de coupe réduites (env. 0,2 à 0,4 m/s). Des principes très développés, comme le principe de rotation [1], permettent de réaliser des opérations de découpe à pleine vitesse (couper/ajouter à la volée), qui est typiquement de 1 m/s. Pour les systèmes de coupe rotatifs, la précision de coupe est généralement plus élevée, en particulier à des taux de drapage élevés.

La longueur de coupe-reprise est la longueur minimale nécessaire pour étendre un câble après que le précédent ait été posé. Cela dépend de la configuration des systèmes de coupe et d'alimentation.

Aujourd'hui, il est également possible de couper des câbles individuels à des angles variables pour des applications spécifiques afin d'obtenir un lay-up plus précis [2]. Cependant, pour les machines de production AFP actuelles pour matériaux therm durcissables, cela n'est pas encore à la pointe de la technologie.

Activation

Le collant des matériaux préimprégnés dépend fortement de la température. Afin d'augmenter l'adhésion du préimprégné sur le composant, la résine des câbles (ou la surface du composant) est légèrement activée par des systèmes de chauffage. L'activation est particulièrement nécessaire dans les systèmes avec alimentation en matériau refroidi, qui refroidissent le matériau à env. 10 à 12 °C.

En fonction de la configuration et de la géométrie du système, il est possible d'activer soit le matériau à déployer, soit le matériau déjà déposé (composant ou moule), ou les deux.

Les systèmes d'activation standard pour les préimprégnés therm durcis sont les lampes à air chaud et infrarouges. Les systèmes à air chaud sont souvent difficiles à contrôler. Les lampes infrarouges, quant à elles, offrent un contrôle rapide et précis.

Compactage

Le système de compactage est généralement constitué d'un rouleau élastique pouvant s'adapter à la forme de la pièce par un mécanisme de compression. Il drapage les câbles sur le composant et assure leur position précise et une adhérence suffisante entre les câbles et le composant. Il doit également éviter d'emprisonner de l'air lors du drapage du matériau.

La géométrie des composants (surfaces à double courbure, rampes, etc.), la force de compactage ainsi que la géométrie, la conception et le matériau du rouleau influencent considérablement la composition.

qualité des pactions. Afin d'assurer un compactage optimal sur toute la largeur de la bande, la largeur du rouleau (et donc le nombre et la largeur des câbles) doit être adaptée à la complexité du composant. Les rouleaux très larges et rigides ne seront pas en mesure de compacter suffisamment des géométries très complexes avec des rampes ou de fortes courbures, ce qui peut conduire à ce que l'on appelle l'effet de pontage.

4.4.3.4.1 Architecture machine pour les processus AFP

L'architecture de la machine détermine la taille maximale des composants, la complexité réalisable des composants, ainsi que la précision et la vitesse de dépôt. Le choix correct de l'architecture de la machine a donc un impact majeur sur la productivité future du système AFP. La section 4.4.1.4 fournit une description détaillée des principales configurations de machines courantes. Ce qui suit détaillera quelques caractéristiques spécifiques de ces configurations pour les applications AFP.

Configuration du portique/pont

Les configurations à portique et à pont (Figure 4.37, a) sont souvent utilisées pour les machines AFP en raison de leur flexibilité et de leur plus haut niveau de précision, en particulier pour les composants de grande surface et les moules plats ou négatifs sans axe de rotation (par exemple, peau de fuselage négative). Les six degrés de liberté de la tête de placement sont utilisés pour les composants présentant des courbures moyennes à élevées. En combinaison avec un axe de rotation (mandrin), il est possible de constituer des moules positifs complexes.

Dans cette configuration, la position du cantre doit être prise en compte car elle affecte la longueur et la complexité du système d'alimentation en matériau, la dynamique de la machine et l'accessibilité du cantre.

Configuration des colonnes

La configuration en colonne (Figure 4.37, b) présente une architecture plutôt compacte avec un système d'alimentation en matière relativement simple car le cantre est proche de la tête de drapage. Il offre des niveaux élevés de flexibilité pour une grande variété de composants. C'est pourquoi il est souvent utilisé avec les technologies AFP, notamment en combinaison avec un axe rotatif externe. Cette configuration est particulièrement adaptée à la fabrication de panneaux, de panneaux positifs de fuselage, de tronçons entiers de fuselage ou de longerons.

Configurations de portique en porte-à-faux et de table

Les configurations en porte-à-faux (Figure 4.37, c) et en portique de table sont particulièrement adaptées aux composants étroits et longs. Les nouveaux développements pour les machines AFP en porte-à-faux, en particulier la découpe/ajout à la volée, permettent de plus en plus la fabrication de composants plans avec un grand nombre d'évidements. Ici, le taux de rebuts est considérablement réduit par rapport aux technologies ATL traditionnelles. L'augmentation simultanée de la productivité et la réduction des rebuts ne sont possibles que grâce aux avantages mentionnés.

technologie « couper/ajouter à la volée », qui peut être utilisée pour la fabrication de stratifiés plans, tels que les longerons.

Robot

Malgré leur précision et leur dynamique limitées par rapport aux mouvements complexes du point central des outils et aux zones de travail, les robots peuvent être utilisés pour la fabrication de composants complexes (Figure 4.37, d). Ils présentent un intérêt particulier pour les applications de recherche et développement en raison de leur flexibilité, de leur conception simple et de leurs coûts relativement faibles.

Les composants très complexes ne peuvent être assemblés qu'en combinaison avec des axes supplémentaires, tels qu'une translation linéaire du robot ou un mandrin, ce qui augmente la complexité de la machine.

Les configurations de têtes à placement étroit pour 8 ou 16 traits sont standard pour les applications robotiques AFP. Ces petites configurations sont les mieux adaptées aux composants ciblés et à la charge utile réduite du robot.



un)



)b



)c



d)

Figure 4.37 Configurations AFP courantes : a) portique, b) colonne, c) porte-à-faux, d) robot
[Autorisation : (a) Premium Aerotec GmbH ; (a, b, c) M. Torres Diseños Industriales S. A. U. ; (d) Coriolis Composites S.A.S.]

4.4.3.4.2 Conception des têtes de placement AFP

La configuration de la tête de placement de fibres doit prendre en compte les caractéristiques générales (telles que le nombre et la largeur du câble), mais également la technologie de la tête de placement. La définition de la géométrie des composants à construire est critique pour l'optimisation de cette configuration.

Configuration de la tête de placement de fibre

La configuration de la tête de placement de fibre et l'interaction entre la largeur et le nombre de câbles déterminent la flexibilité et la productivité de la tête de placement AFP (Fig. 4.22). Les paramètres de configuration les plus importants sont les suivants :

Largeur de remorquage : les remorquages larges augmentent la productivité et correspondent à la conception simple de la machine ; cependant, ils augmentent également les rebuts et l'imprécision du contour du drapage. Leur faible drapabilité limite le drapage de géométries complexes (comme les composants à forte courbure et les rampes). Les tailles de remorquage courantes sont 1/2", 1/4" et 1/8".

Largeur totale de la couche : la productivité peut être augmentée en augmentant la largeur totale de la couche (en augmentant le nombre de câbles ou la largeur). Cependant, le rouleau de compactage proportionnellement plus large créera davantage d'interférences géométriques entre la tête de placement et le moule, en particulier dans les composants plus complexes.

Cela entraînera à son tour des problèmes de compactage et limitera la gamme de géométries des composants.

Nombre de remorquages : les applications axées sur une flexibilité et une capacité de direction élevées utilisent un nombre réduit de remorquages étroits (8 à 16 remorquages de 1/8" ou 1/4" de largeur).

Les composants présentant des niveaux de complexité modérés et des exigences de productivité élevées sont mieux servis avec un nombre plus élevé de câbles plus larges (16 à 32 câbles de 1/4" ou 1/2") de largeur.

Par conséquent, la configuration de la tête de placement (largeur et nombre de câbles) doit être soigneusement optimisée pour chaque application spécifique afin d'atteindre les objectifs souhaités en termes de productivité, de qualité des composants et de complexité.

Technologie de superposition

Bien que les principes décrits de la technologie AFP soient universellement valables pour toutes les applications AFP, il existe différents systèmes de placement de fibres disponibles sur le marché. Certains d'entre eux sont dotés de systèmes exclusifs et brevetés, qui peuvent différer considérablement en termes de technologie de drapage utilisée (section 4.4.3.4). Ils affectent considérablement la flexibilité de la machine, la qualité et la précision du drapage ainsi que la productivité du processus AFP.

Les critères suivants doivent être pris en compte lors de la sélection d'une technologie AFP :

Production prévue : La définition claire du composant à construire, de la géométrie des composants, des exigences de productivité et de qualité, des matériaux préimprégnés à utiliser, ainsi que d'autres restrictions générales, est cruciale pour la sélection éclairée de la technologie AFP optimale.

Creel :

Position du cantre : affecte l'accessibilité, l'alimentation globale du matériau et, en raison de sa structure volumineuse, la conception globale de la machine.

Cantre standard, configurations d'autosplisseur ou systèmes de changement de tête de placement :
Dépend de la production prévue et du temps nécessaire au chargement du matériau.

Sous-systèmes :

Systèmes de découpe et d'alimentation : systèmes de « coupe/ajout à la volée » très productifs fonctionnant à des vitesses de dépôt maximales (environ 1 m/s) et avec une grande précision lors de l'ajout et de la découpe, ou plus basiques, peu encombrants, mais nettement moins productifs. configurations tives de type guillotine.

Superposition bidirectionnelle : Décrit la possibilité de superposer un composant en alternant dans les deux sens, soit en tournant rapidement la tête de placement, soit en changeant la position du rouleau de superposition. Cette approche évite les longs trajets de positionnement ; il est particulièrement intéressant pour le superposition de composants de grande taille.

Système d'activation : Il doit être capable d'atteindre un pouvoir collant et une activation suffisants dans le matériau à déposer sans limiter la vitesse de dépôt. De plus, il doit fournir un contrôle approprié sous différents paramètres de processus.

Coûts, systèmes supplémentaires et options d'extension :

Coût du capital : les dépenses en capital, les coûts d'infrastructure et les coûts de bas de page, entre autres, doivent être équilibrés en termes de productivité et d'utilisation.

Coût d'exploitation : les consommables, l'énergie, le refroidissement et la consommation d'air, etc., ainsi que les coûts de maintenance, doivent être évalués et équilibrés en fonction du type de technologie AFP.

Coût du personnel : Ici, les coûts nécessaires au fonctionnement des machines doivent être pris en compte. Ils comprennent non seulement les coûts d'opérateur, mais également les coûts de programmation, qui dépendent de la technologie et du logiciel AFP sélectionnés, ainsi que d'autres coûts indirects de personnel.

Coût des systèmes supplémentaires : ceux-ci incluent les systèmes requis pour répondre aux exigences de production. Par exemple, des systèmes pour augmenter la précision du positionnement (comme les systèmes de mesure laser) ou des axes contrôlés supplémentaires (axe de rotation, etc.) pour les opérations de drapage.

Options d'extension : Effets des systèmes d'expansion sur les performances globales (précision, productivité, etc.) et leurs coûts respectifs.

Confort de l'opérateur :

Logiciel de programmation et de simulation hors ligne : le logiciel est un facteur important à prendre en compte lors de la sélection d'un système AFP. Il détermine le temps de programmation, le temps nécessaire à l'optimisation et au test des nouveaux composants, la qualité des composants et la productivité. Un logiciel techniquement abouti et un programme de pièces optimisé exploiteront pleinement les capacités de la machine et faciliteront des résultats optimaux en termes d'utilisation des ressources.

Maintenance et chargement du matériel : chargement et maintenance simples du matériel/
les systèmes de nettoyage réduisent les temps d'arrêt des machines.

En fonction de l'application spécifique, des critères supplémentaires peuvent également devoir être pris en compte.

En général, les configurations des machines peuvent être adaptées individuellement pour répondre aux demandes des clients.

4.4.4 Productivité et rentabilité des processus de drapage

Afin de déterminer le processus de drapage le mieux adapté, une évaluation économique adéquate est cruciale. Entre autres choses, la productivité du drapage est un paramètre décisif dans l'évaluation des futurs processus de drapage. Cela nécessite une analyse complète de toutes les étapes de fabrication ultérieures tout au long du chemin critique d'utilisation de la machine (par exemple, assemblage, calibrage et démontage du moule, transfert de composants) ainsi que des coûts récurrents et des investissements en capital requis pour l'ensemble de la configuration. processus. Les structures de coûts respectives, les taux de production souhaités, ainsi que la technologie de superposition et la conception de la machine considérées influenceront considérablement cette analyse.

4.4.4.1 Productivité des entrepôts

La comparaison des équipements et des technologies nécessite de déterminer les performances d'assemblage de ces procédés. Les utilisateurs finaux, en particulier, expriment souvent cette productivité en kg/h. Cependant, il n'est pas réaliste de formuler une déclaration générale concernant la productivité en ces termes, car elle dépend de divers facteurs, notamment les suivants :

Largeur de superposition, configuration de la machine et technologie de superposition

Poids du matériau et de la surface

Données spécifiques aux composants (complexité et taille des composants)

Stratégies de programmation et de mise en place

Afin de permettre une meilleure comparabilité et analyse des capacités nettes de la machine et de la technologie, la vitesse moyenne de mise en place (ALV) a été introduite comme unité appropriée. La section suivante aborde également sa relation avec d'autres unités de productivité courantes.

Vitesse moyenne de mise en place (ALV) :

En général, les technologies de drapage courantes ont une vitesse de drapage maximale d'env. 1 m/s. Cette valeur sera donc utilisée comme référence. Cependant, des configurations spécifiques de machines permettent des vitesses maximales plus élevées, même si ces performances maximales ne seront atteintes que pour certaines phases du processus de superposition des composants. La vitesse moyenne de dépôt de l'ensemble du processus est nettement inférieure en raison d'une grande variété de retards et de réductions de productivité, par ex. par exemple, provoqués par des parcours courts et/ou des courbures, des courses à vide, des mouvements de transition et autres.

Dans ce qui suit, nous présenterons la vitesse nette moyenne de dépôt, mesurée en mètre linéaire net par seconde (nlm/s), qui permet de déterminer les capacités absolues de la machine. Net ALV prend en compte non seulement la vitesse de stockage, mais également les opérations de processus supplémentaires pendant le stockage qui réduisent considérablement la productivité :

1. Vitesse de processus réduite :

Phases d'accélération et de décélération pendant le lay-up, par ex. ex., début et fin de la bande

Systèmes de coupe : vitesse de coupe réduite lors de la réalisation de coupes en forme nette (ATL), ou avec des systèmes de type guillotine (AFP), etc.

Réduction de la vitesse liée aux processus et aux matériaux ; par exemple en raison d'une complexité géométrique élevée, d'un pouvoir collant limité, d'un drapé extrême, de la qualité du drapage, etc.

2. Temps non productif :

Temps d'attente liés aux processus (cycles SPS/CNC, processus non optimisés en termes de temps)

Déplacements de machines non productifs, e. par exemple, en raison du temps entre les bandes, les séquences et le temps supplémentaire causé par une programmation non optimisée

3. Étapes du processus non productives : e. par exemple, stockage de ferraille sur une zone de ferraille externe (ATL)

De plus, l'ALV est largement indépendant de la largeur de la couche, du matériau et du poids surfacique. Ici, seuls la complexité et la taille des composants, la technologie et les paramètres de superposition ainsi que le processus lui-même exercent une influence significative. Cela permet même de comparer les performances nettes de drapage de différents processus (ATL vs. AFP) et technologies de drapage (fabricants de machines) pour le même composant.

La figure 4.38 est une représentation qualitative de l'ALV en fonction de la longueur moyenne du drapage pour différentes technologies de drapage et complexités des composants.

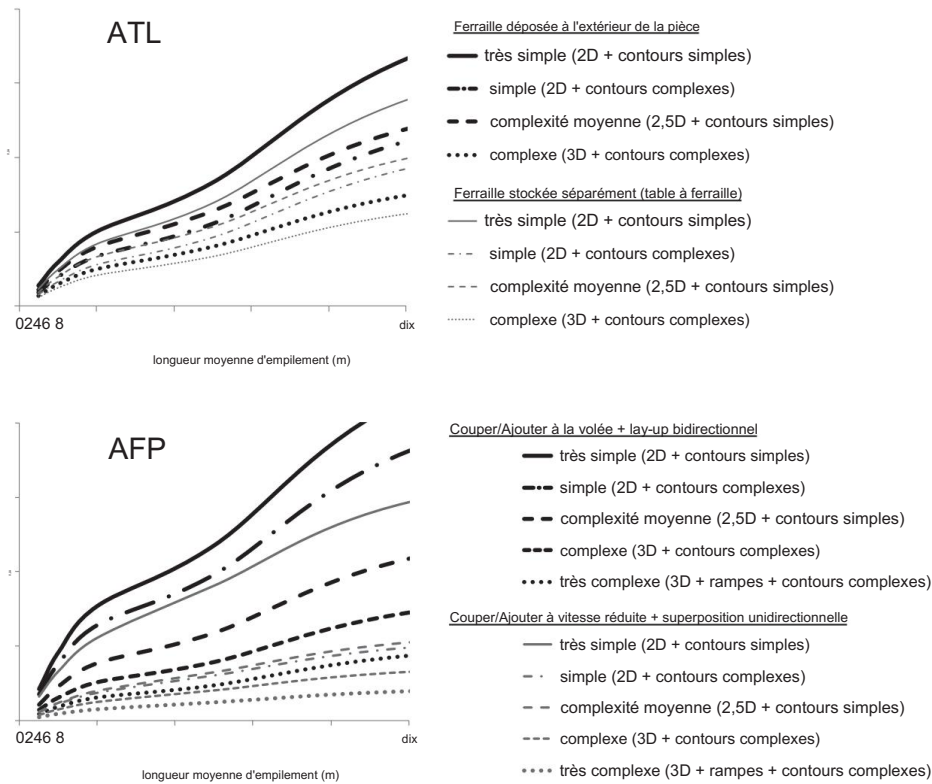


Figure 4.38 Valeurs qualitatives de l'ALV (nlm/s) pour diverses technologies AFP et ATL et complexités des composants

Taux de drapage surfacique (m²/h) :

Le taux de drapage surfacique (généralement mesuré en m²/h) dépend de l'ALV (nlm/s) et de la largeur totale du drapage. Le nombre et la largeur des câbles/bandes déterminent ainsi la largeur de drapage par rangée (Figure 4.39).

Par conséquent, le taux de drapage surfacique est considéré comme une mesure raisonnable pour la comparaison de différentes configurations de têtes de placement. Veuillez noter que la largeur et le matériau de la superposition peuvent affecter la vitesse de superposition.

Productivité en termes de masse (kg/h) : Pour chaque

application spécifique et matériau préimprégné, le taux de superposition surfacique et le poids spécifique du matériau peuvent être utilisés pour calculer la productivité en termes de masse de matériau kg/h.

Largeur totale de superposition des configurations de machines typiques (mm)									
Bande / Largeur de remorquage		Nombre de bandes ou de câbles							
		1	2	4	8	16	24	32	
JTA	75 mm 75 mm	150 mm	300 mm						
	150 mm 150 mm	300 mm	600 mm						
	300 mm 300 mm	600 mm							
EVA	1/8"	3,175 mm	6,35 mm	12,7 mm	25,4 mm	50,8 mm	76,2 mm	101,6 mm	
	1/4"	6,35 mm	12,7 mm	25,4 mm	50,8 mm	101,6 mm	152,4 mm	203,2 mm	
	1/2"	12,7 mm	25,4 mm	50,8 mm	101,6 mm	203,2 mm	304,8 mm	406,4 mm	

Figure 4.39 Largeur totale de superposition pour les technologies et configurations de superposition courantes

4.4.4.2 Rentabilité des processus automatisés de drapage

Productivité du sol au sol

La productivité du procédé n'est pas déterminée uniquement par la productivité de mise en couche mentionnée ci-dessus. Les opérations supplémentaires qui affectent la disponibilité des machines contribuent de manière significative à la productivité globale effective. La productivité d'étage à étage prend en compte à la fois la productivité de pose ainsi que la diminution de productivité causée par les processus qui affectent le temps machine disponible, tels que les suivants :

1. Préparation du lay-up :

- Montage du moule et, le cas échéant, préparation du matériel de superposition
- Mesure et étalonnage/outillage
- Préparation de la surface du moule sur l'enveloppe de la machine
- Tests de machines et de procédés, essais à sec, etc.

2. Intervalles de temps non productifs pendant le désarmement :

- Chargement du matériel
- Opérations de nettoyage et d'entretien pendant la phase d'entreposage
- Contrôle de la qualité

3. Post-traitement :

- Démoulage de composants ou autres travaux à l'intérieur de l'enveloppe de la machine (ensachage, etc.)
- Déchargement du moule

En fonction de la configuration de la machine et de l'application spécifique, ces délais peuvent jouer un rôle important par rapport au temps d'immobilisation parfait. Par conséquent, une adaptation précise de la technologie de superposition et des processus supplémentaires à l'application prévue est cruciale.

Critères de productivité supplémentaires

Outre la productivité des machines (par exemple, la productivité d'un étage à l'autre), d'autres critères doivent être soigneusement pris en compte afin d'évaluer la rentabilité d'une technologie. Les coûts récurrents ainsi que les coûts d'investissement en capital et les coûts non récurrents sont particulièrement considérables.

1. Coûts récurrents :

Coûts du matériel (matériel de bande, matériel auxiliaire, consommables, pièces de rechange, licences de logiciels, etc.)

Frais de personnel (fonctionnement de la machine, maintenance, programmation, etc.)

Coûts de construction

Coût du capital investi et intérêts

2. Investissement en capital et coûts non récurrents :

Préparation du modèle CAO

Programmation des composants

Tests de drapage pour optimisation du programme (utilisation du matériel et des machines, etc.)

3. Utilisation de l'équipement de dépôt pour des opérations et des processus supplémentaires :

Découpage, superposition de matériaux supplémentaires, tels que verre, maille de cuivre, etc.

Évaluation des économies réalisées sur d'autres équipements et sur le temps de traitement

Temps d'arrêt des équipements en raison d'opérations supplémentaires

4. Temps d'arrêt de la machine causé par la maintenance :

Entretien et nettoyage programmés

Réparations non programmées

Prix unitaire par composant

En fin de compte, toutes les considérations concernant la productivité peuvent se traduire par un prix unitaire des composants. En général, le prix des composants sera le critère permettant de déterminer la viabilité économique d'une machine de superposition et d'une configuration de superposition. Une telle analyse est également utile pour relier les investissements en capital et les coûts structurels à la productivité effective. L'objectif évident est la sélection de la configuration de machine optimale pour une gamme de composants spécifique.

4.5 Pultrusion

Le procédé de pultrusion est l'un des procédés les plus anciens pour la fabrication de composants en plastique renforcés de fibres continues, et en même temps le procédé continu le plus ancien. Dans un procédé de pultrusion typique (Figure 4.40), les fibres de renforcement sont imprégnées d'une matrice (thermoplastique ou thermodurcissable) à l'aide d'un processus de mouillage, puis durcies dans une matrice de formage. Ici, le profilé est tiré en continu à travers la matrice et peut ensuite être coupé à longueur avec une scie. Aujourd'hui, ce procédé facilite la fabrication automatisée et rentable de profilés en plastique renforcé de fibres de différentes géométries. Le nom pultrusion est dérivé de « tirer » et « extrusion ». En fonction des caractéristiques mécaniques que doit présenter le profilé à fabriquer (par exemple, la rigidité), une large gamme de textiles en fibres différents peut être utilisée, comme des mèches, des nattes de fibres orientées de manière aléatoire, des tissés, des piles ou des tissus 3D. . Le processus peut être combiné avec d'autres, par ex. par exemple, avec un procédé de tressage, également appelé « pull-tressage », particulièrement adapté aux sections rondes.

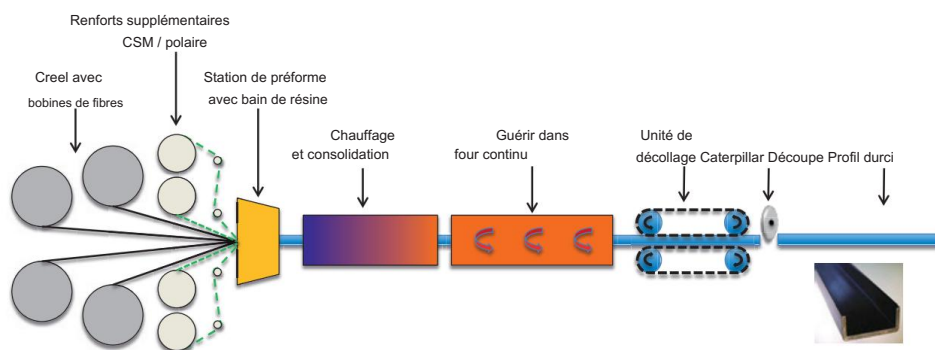


Figure 4.40 Ligne de pultrusion, schématique

Le processus de pultrusion peut être différencié en deux variantes de processus. Au cours d'un processus ouvert, les fibres de renforcement sont retirées des rouleaux ou des rouleaux d'un système de rayonnage à cantres et guidées sur un rouleau plongeur à travers un bain de résine. Un index de cardage fournit la répartition/orientation souhaitée des fibres dans les profilés fabriqués. Les fibres sont humidifiées avec de la résine dans le bain de résine et peuvent passer par une ou plusieurs stations de préformage qui consolident de plus en plus les fibres imprégnées de résine et se rapprochent lentement du profil final souhaité. Au cours d'un processus fermé, les fibres de renforcement ne sont exposées à la résine qu'à leur entrée dans la matrice de formage. Ici, la résine liquide est poussée à travers la filière sous pression. Cette approche permet d'obtenir des teneurs en volume de fibres plus élevées que celles obtenues dans les procédés ouverts. De plus, ce procédé permet une réduction significative des émissions.

sessions, e. par exemple, à partir de résines contenant du styrène (UP, VE). Dans la filière de durcissement, qui est généralement chauffée par des radiateurs électriques, le matériau imprégné est rapidement amené à la température de durcissement. Selon le système et le type de résine (EP, UP), les températures de durcissement varient entre 100 et 180 °C. Habituellement, le profilé chauffe lentement de l'extérieur vers l'intérieur (en fonction de la configuration de la matrice), provoquant le gélification et le durcissement de la résine. Simultanément, la friction entre le composant et la surface de la matrice augmente considérablement. Afin de réduire ce frottement, des agents de démoulage internes peuvent être ajoutés au système de résine, ou les surfaces de la matrice peuvent être recouvertes d'agents de démoulage appropriés. Pour les profilés à grand volume, il est particulièrement important de maintenir une répartition constante de la chaleur afin d'éviter les fissures dans la matrice qui peuvent être provoquées par différents degrés de durcissement entre les couches externe et interne du stratifié. Le profil durci est ensuite coupé aux longueurs souhaitées. Le processus de pultrusion est piloté par un système de préhension/extraction, par exemple sous la forme d'un système de pince hydraulique à mouvement alternatif ou d'un système de type chenille-tracteur à bande de roulement opposée.

Outre ces deux variantes de processus, le traitement par pultrusion directe des préimprégnés gagne en popularité. Les avantages de l'utilisation d'un matériau semi-fini incluent également le fait que le rapport fibres/matrice est déjà optimisé et que des teneurs volumiques élevées en fibres (60 à 65 %) peuvent être atteintes. Les matériaux préimprégnés permettent également l'utilisation de résines matricielles très visqueuses (par exemple en utilisant des durcisseurs), qui ne peuvent pas être utilisées dans les procédés à bain de résine ouvert. Par conséquent, même les préimprégnés hautes performances utilisés dans les applications aéronautiques peuvent être pultrudés. Un autre avantage de ces systèmes est le fait qu'ils ne libèrent ni solvants ni styrène.

La figure 4.41 illustre la séquence du processus. Contrairement aux deux variantes de pultrusion décrites ci-dessus, il n'y a pas d'apport externe de résine lorsque les préimprégnés sont pultrudés. Au lieu de cela, les préimprégnés sont tirés de bobines, préformés par des poulies de guidage, puis pressés, chauffés et durcis dans une section de four. En fonction de la géométrie et du matériau préimprégné utilisé, les préimprégnés sont découpés en bandes plus étroites avant d'être introduits dans la ligne de pultrusion. Ici, les préimprégnés sont d'abord déroulés, puis coupés à la largeur requise qui est déterminée par leur position dans la structure stratifiée, et enfin réenroulés. Cette approche permet la fabrication de structures de couches complexes avec des orientations variables, ainsi que des combinaisons de rubans UD et de préimprégnés de tissus, tels que des longerons ou des nervures nécessaires dans l'industrie aéronautique. Par exemple, JAMCO, au Japon, utilise des préimprégnés pour fabriquer des profils de longerons continus pour les avions de la série Airbus A320 et A380. Ici, les longerons en double T sont fabriqués à partir de coupes plates de préimprégnés, comme le montre schématiquement la figure 4.41.

Plusieurs couches de ruban UD et de tissu préimprégné sont pré-assemblées, puis les bandes sont introduites à travers des poulies de renvoi et de préforme dans le système de pultrusion, façonnées par intermittence et durcies.

Semblable aux processus de pultrusion traditionnels, le frottement entre les surfaces du composant et de la matrice augmente le long de la matrice. Les surfaces des matrices doivent être recouvertes d'agents de démoulage appropriés, car il n'est pas possible d'ajouter ces agents aux systèmes préimprégnés.

afin de réduire la friction à la surface de la matrice. Le profilé durci est ensuite coupé à longueur. Ce procédé de pultrusion est également piloté par un système de type chenille-tracteur. Pour les systèmes préimprégnés typiques de l'industrie aéronautique, l'alimentation en matériau peut être cadencée pour faciliter un temps de durcissement plus long, de sorte qu'en fait ce processus doit être considéré comme quasi continu.

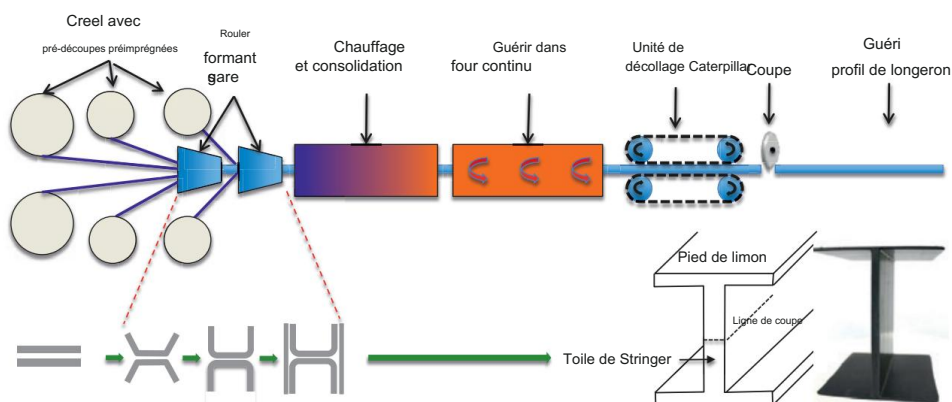


Figure 4.41 Processus de pultrusion pour les matériaux préimprégnés

Secar Technologie GmbH, Autriche, fabrique des profilés en tôle, en angle et creux pour diverses applications industrielles et aéronautiques à partir de systèmes préimprégnés à durcissement rapide (avec des températures de durcissement allant de 80 à 150 °C) en utilisant un processus de pultrusion entièrement continu (Figure 4.42).

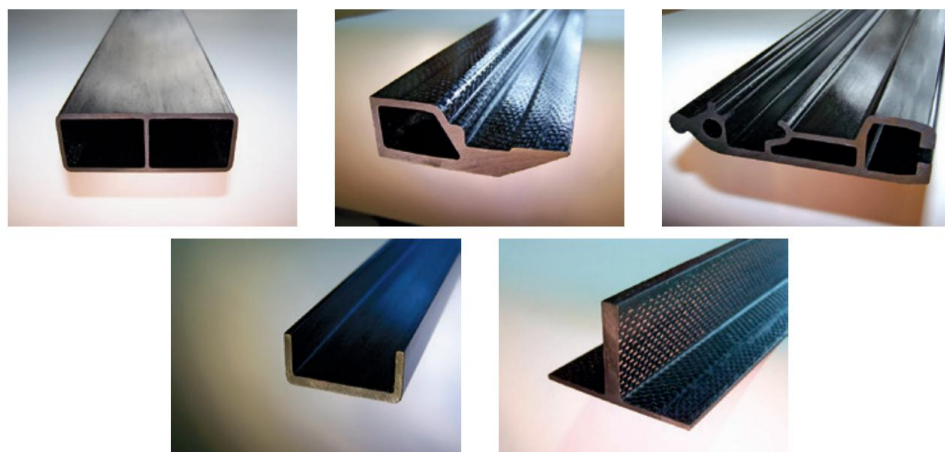


Figure 4.42 Profils de pultrusion [Autorisation : Secar Technologie GmbH]

Profils/Remplisseur de gousset

Aujourd'hui, la technologie a atteint un niveau de maturité qui permet de fabriquer non seulement des profilés droits, mais aussi des profilés courbes avec un rayon défini.

Les profils courbes, ainsi que les profils à sections transversales variables, présentent un intérêt particulier dans l'industrie aéronautique car ils facilitent une conception légère utilisant des matériaux renforcés de fibres.

Actuellement, les profilés tels que les longerons et les longerons, sont fabriqués à l'aide de matrices spécifiquement adaptées à chaque composant. Les piles de préimprégnés correspondantes sont superposées, découpées, préformées par formage à chaud et finalement durcies dans un dispositif d'outillage. Ici, l'utilisation d'une pultrusion de préimprégnés adaptée peut conduire à une simplification significative et à une réduction des coûts.

Outre les profilés durcis, il est également possible de fabriquer des renforts de gousset triangulaires à partir de matériaux pré-imprégnés, ce qui présente un intérêt particulier dans l'industrie aéronautique. Le mastic illustré à la figure 4.43 est utilisé pour recouvrir la soudure d'angle créée lorsque deux profils en forme de L sont joints pour former un profil en T (longeron). La soudure d'angle provoquerait des porosités et des changements dans l'orientation des fibres pendant le durcissement du profil du longeron. C'est pourquoi il est souvent rempli du même matériau (Figure 4.43).

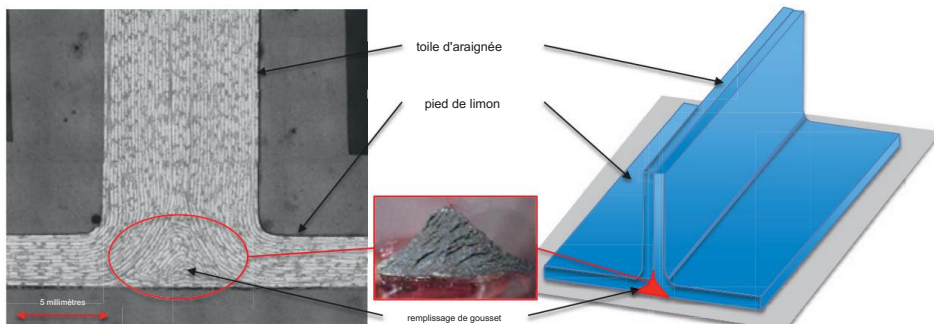


Figure 4.43 Remplissage de gousset dans le pied d'un limon en T

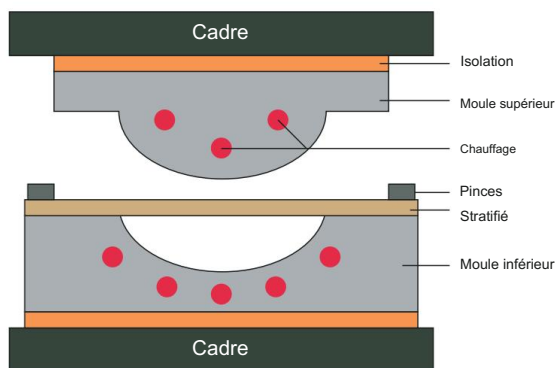


Figure 4.44 Remplissage de gousset fabriqué à partir de préimprégné, non durci [Autorisation : Secar Technologie GmbH]

4.6 Formation de drapé à chaud

Des processus et des outils flexibles et adaptables sont nécessaires pour produire une grande variété de composants composites souvent complexes à l'échelle industrielle à partir d'empilements de préimprégnés plats et pré-imprégnés.

Des technologies de façonnage basées sur des méthodes de pressage à chaud ont été établies (Figure 4.45) ; cependant, ils ne sont pas flexibles et sont très limités au niveau de leurs dimensions géométriques en raison de leurs outils massifs. Un autre inconvénient majeur des technologies de pressage est le fait qu'elles ne permettent pas de réaliser facilement des géométries complexes, telles que des contre-dépouilles. Souvent, la presse est utilisée à la fois pour le processus de façonnage des matériaux ainsi que pour le processus de durcissement ultérieur. Dans ces cas, des cycles de durcissement très courts sont nécessaires afin de faciliter le cycle de mise en forme suivant. Les matériaux renforcés de fibres nécessitent également une attention particulière en ce qui concerne leur comportement anisotrope typique, ce qui entraîne une dépendance directionnelle des propriétés du matériau. Compte tenu du fait que les fibres continues de carbone ou de verre inhibent l'écoulement et l'allongement du matériau, l'utilisation de méthodes de pressage à chaud pour les applications de mise en forme industrielle de grands volumes d'empilements plats de préimprégnés est limitée et nécessite des concepts et des matériaux spécifiquement adaptés. .

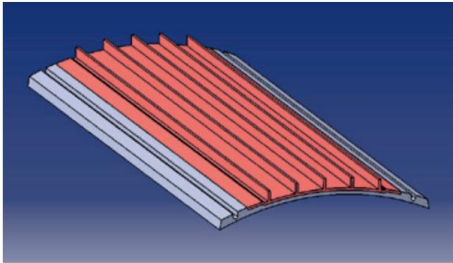


Graphique 4.45

Technologie de pressage à chaud [4]

C'est pourquoi la technologie dite de « formage à chaud » est souvent utilisée pour traiter et façonner des préimprégnés hautes performances. Le concept de formage à chaud est dérivé des procédés de thermoformage utilisés pour les matériaux thermoplastiques. Il facilite la fabrication de géométries souvent très complexes, telles que des longerons multi-courbes ou des nervures/aillettes à partir d'empilements de préimprégnés plats et bidimensionnels (produits par ATL et des systèmes de découpe automatisés) qui peuvent ensuite être intégrés dans les composants finaux sous leur forme brute (état B). Des exemples issus de la production de composants aéronautiques incluent les tôles d'aile de l'Airbus A350XWB, pour lesquelles des éléments de longerons de 33 m de long, fabriqués par formage à chaud, sont intégrés à la tôle précurcie.

ing skin, ou les longerons en C de l'empennage vertical de l'A380, pour lesquels des piles de préimprégnés plats, jusqu'à 10 mm d'épaisseur et 6 m de long, sont formées et assemblées en profils en C (Figure 4.46).



Graphique 4.46

Panneau renforcé par des longerons [Autorisation : Ina Steinicke]

Le formage à chaud utilise un équipement de formage de diaphragmes dérivé du thermoformage de matériaux thermoplastiques. Nous distinguons les équipements à simple (SD) et à double diaphragme (DD) (Figure 4.47 et Figure 4.48). La pile de préimprégnés est chauffée dans la machine à membrane par des radiateurs IR, des soufflantes à air chaud ou des radiateurs inductifs (1). Ensuite, le matériau (3) est formé sur l'outil (4) à l'aide de membranes en caoutchouc flexibles (diaphragmes) (2) qui sont tendues sur des cadres de tension. Un vide est créé entre la membrane et l'outil, qui presse lentement la membrane et donc la pile de préimprégnés contre l'outil. Les températures de formage typiques pour les matériaux pré-imprégnés (préimprégnés ou tissus/empilements avec liants) varient entre 60 et 80 °C. Les temps de cycle de formage à chaud (chauffage, formage, refroidissement) varient considérablement en fonction de l'épaisseur du stratifié ou du nombre de plis. Les deux variantes conviennent à presque toutes les géométries et offrent de très bons résultats de formage, même pour les pièces présentant des contre-dépouilles.

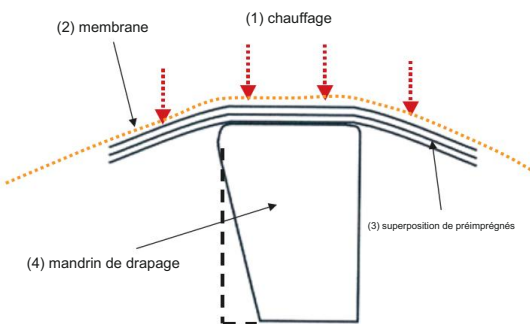


Figure 4.47 Processus à diaphragme unique (processus SD) [4]

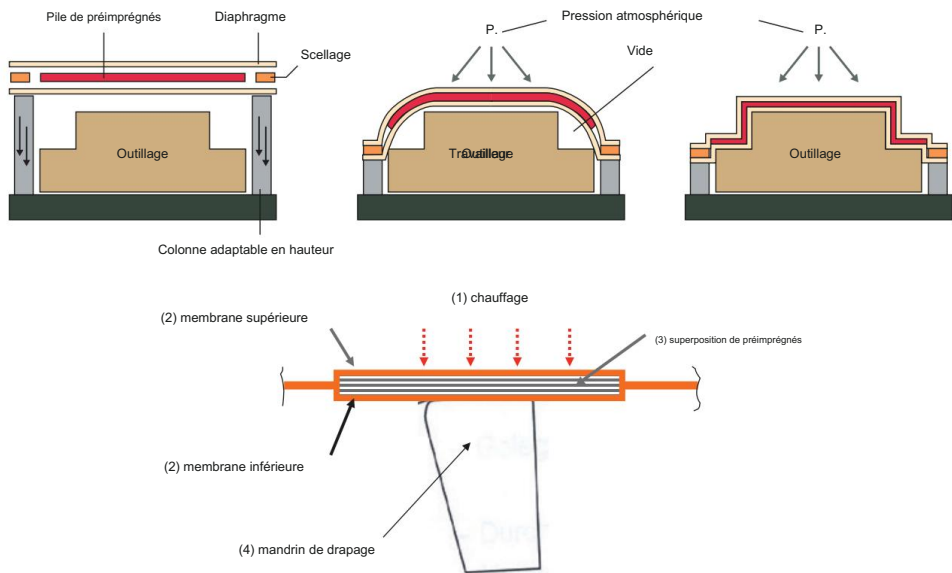


Figure 4.48 Procédé à double membrane (procédé DD) [4]

Pour les opérations de formage de haute qualité, il est essentiel de permettre aux plis individuels de glisser les uns sur les autres (glissement intercalaire) pendant le processus de formage, ce qui transforme un plat en une géométrie courbe. Le glissement des couches dans les empilements de préimprégnés est souvent très limité en raison des viscosités matricielles généralement élevées à température ambiante. Par conséquent, le matériau doit être chauffé uniformément afin de réduire la viscosité de la matrice et de permettre un glissement intercouche maximal. Après le formage, un glissement de pli réussi peut être identifié par ce que l'on appelle « l'effet livre » (Figure 4.49). Cependant, des précautions doivent être prises lors du chauffage du matériau afin d'éviter un durcissement prématuré de la matrice. L'étape B de la matrice préimprégnée est également importante, car elle limite le flux excessif de résine et donc le « saignement » des préimprégnés lorsqu'il est chauffé.

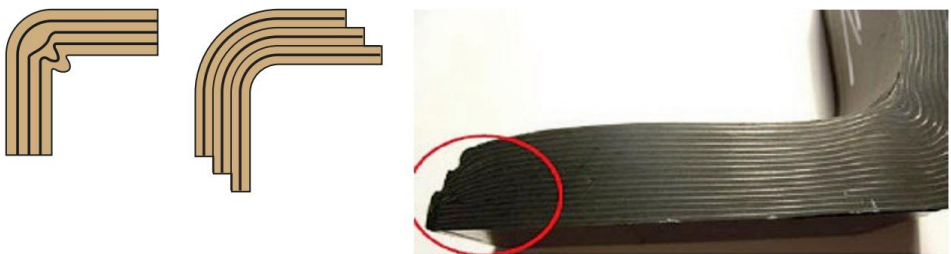
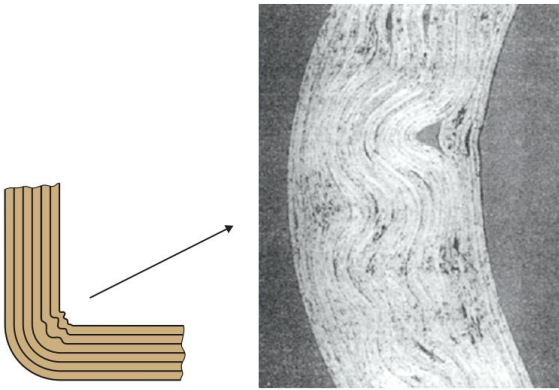


Figure 4.49 Stratifié formé sans (à gauche) et avec « effet livre » [4, 5]

Un glissement insuffisant entraîne généralement des parcours de fibres perturbés, qui à leur tour provoquent des rides/boucles et la formation de vides dans le stratifié, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du composite (Figure 4.50).



Graphique 4.50
Vides et boucles de fibres dans le
intérieur du stratifié [4, 5]

Les critères de qualité essentiels pour des opérations de formage réussies sont les suivants :

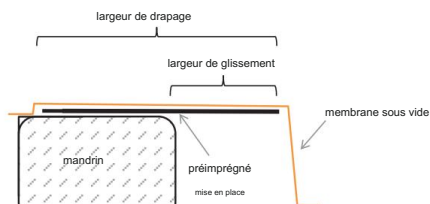
Glissement de plis individuels les uns sur les autres (glissement inter-couches)

Différences de longueur le long des bords du stratifié parallèles à la ligne de formage

Formation des bords = effet livre

Lors de la préparation des processus SD, une pile de préimprégnés plats et découpés est positionnée sur un outil de formage (en métal ou en bois dur). Le rayonnement thermique des radiateurs céramiques ou infrarouges, ou des ampoules électriques, chauffe la membrane par le haut. La conduction thermique augmentera alors la température dans toute l'épaisseur du stratifié. L'augmentation de la température sur la face supérieure de la membrane suit généralement un profil linéaire (ou rampe) jusqu'à atteindre une température définie. Une fois cette température atteinte, un contrôleur intégré maintient la température sur la face supérieure de la membrane pendant que la pile continue de chauffer et se rapproche de la température de la membrane. Il existe toujours un gradient de température entre la face supérieure de la membrane et la face inférieure du stratifié en raison des effets de refroidissement sous la membrane et de l'effet isolant du diaphragme. Les outils de formage des métaux en particulier peuvent permettre une perte de chaleur incontrôlée de la pile vers l'outil. Ce flux thermique crée un gradient de température supplémentaire au sein de la pile et peut provoquer la formation de rides/boucles dans le stratifié, comme indiqué précédemment (Figure 4.50).

Il n'est pas obligatoire de chauffer toute la largeur de la pile, car seule la « largeur de glissement » dans la zone de formage nécessite un chauffage. Par conséquent, des systèmes de chauffage ont été développés qui permettent de chauffer par le bas, directement au niveau de la cheminée, via de l'air chaud (Figure 4.51).



Graphique 4.51

Chauffage de la « largeur de glissement » d'une pile de préimprégnés

Le procédé DD est légèrement plus complexe en termes de chaîne de processus et de configuration de machine que le procédé SD, car l'empilement de préimprégnés doit être positionné entre deux membranes avant de pouvoir être placé sur l'outil à former. Cependant, les résultats de formage sont d'une qualité encore supérieure à ceux obtenus par les procédés SD, en particulier lorsque des empilements de préimprégnés épais (jusqu'à 10 mm) sont formés. La pile peut être chauffée des deux côtés et la perte de chaleur dans l'outil de formage peut être évitée.

Les systèmes commerciaux de formation de drapage à chaud sont proposés par Premium Aerotec Varel, Allemagne ou Laminating Technology, Royaume-Uni, entre autres.



Figure 4.52 Formeuse de drapage chaud [Autorisation : Laminating Technology]

Quelle que soit la technologie de formage choisie, il est important de considérer que les matériaux renforcés de fibres continues nécessitent des géométries de composants qui ne limitent pas le glissement interlaminaire des fibres, car contrairement aux matériaux renforcés de fibres courtes et aux métaux, les matériaux préimprégnés ne peuvent pas être déformés plastiquement dans le sens des fibres.

Dans ce qui suit, nous décrirons une approche possible en utilisant une géométrie de trou de main emboutie (Figure 4.53) comme exemple.

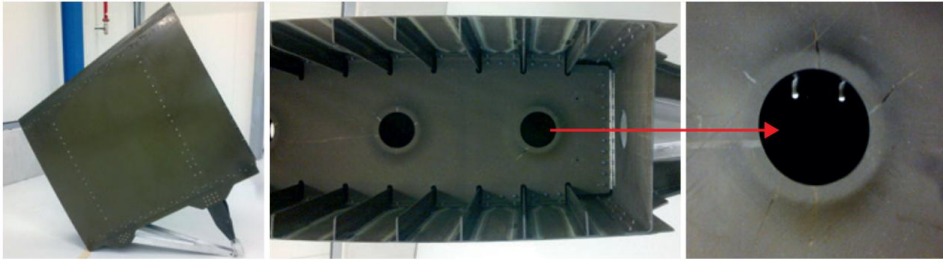
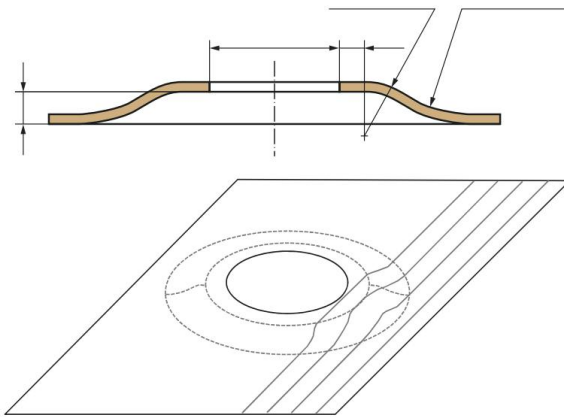


Figure 4.53 Exemple d'empennage vertical fabriqué à partir de plastiques renforcés de fibres de carbone, nervures/ailerons avec trous pour mains sertis

Afin de fournir une amplitude de mouvement suffisante aux fibres dans la zone limite des nervures/ ailettes de renforcement, un trou circulaire doit être découpé dans la pile plate de préimprégnés. De plus, la géométrie de l'outil doit être adaptée à la fois au processus et au matériau sélectionnés. Les rayons des nervures/nageoires doivent être particulièrement pris en compte (Figure 4.54). Notez que le gradient de contrainte de cisaillement à la base de la nervure/aileron augmente avec la diminution du rayon inférieur R_I , ce qui à son tour augmente l'effet de l'allongement des fibres (Figure 4.54 et Figure 4.55). En même temps, R_I influence la longueur de rampe l . Ainsi, avec l'augmentation de la longueur de rampe l , le gradient de contrainte de cisaillement diminue et donc la différence de longueur de fibre diminue également. En conséquence, le risque de formation de plis/boucles dans l'orientation des fibres diminuera.



Graphique 4.54

Exemple de géométrie : nervures/ailerons de renforcement avec trou de main serti [4]

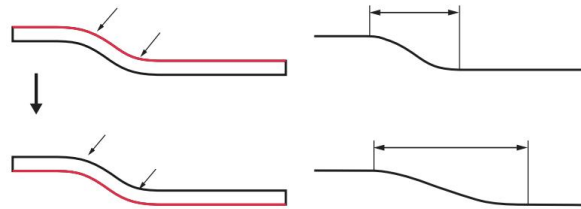


Figure 4.55 Effet des rayons variables (R_i = rayon inférieur, R_u = rayon supérieur) [4]

Pour la réalisation d'un trou de main renforcé de nervures/ailettes en préimprégnés DU (structure stratifiée quasi-isotrope), le rayon de formage approprié peut être déterminé, par ex. par exemple, par des essais préliminaires afin que les exigences mentionnées ci-dessus ainsi que les exigences statiques pour la géométrie soient respectées. Compte tenu du fait que les températures de formage sont relativement basses (60 à 80 °C) et ne nécessitent pas d'outil métallique, le bois dur peut être choisi comme matériau d'outil. Cela permettra également de maintenir les dépenses nécessaires à la construction à un faible niveau et de minimiser les pertes de chaleur de la pile vers l'outil. Un défi des processus DD réside dans la précision requise avec laquelle la pile et les membranes doivent être positionnées sur l'outil. Dans notre exemple, l'outil était conçu comme un outil de thermoformage qui fournit un bord surélevé pour l'alignement externe et le positionnement du stratifié.

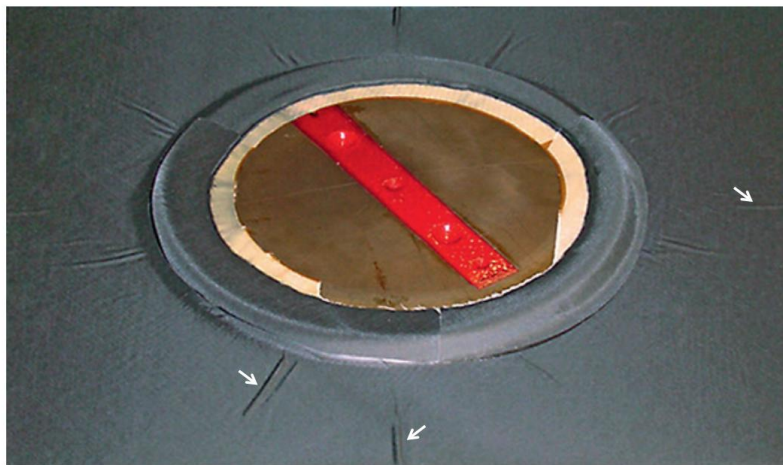


Figure 4.56 Outil de formage pour le procédé à double membrane [4]

La figure 4.56 montre un trou de main serti fabriqué par le procédé de drapage à chaud (DD). De légères rides/boucles dans la direction de 45° peuvent toujours être détectées. Bien qu'un trou ait été découpé dans la pile plate et que les rayons aient été adaptés au composant et à l'outil, il n'a pas été possible d'empêcher complètement la formation de ces plis.

boucles en raison des différences de longueur des fibres. Cependant, l'exemple démontre qu'il est possible de former à chaud des piles de préimprégnés UD dans une géométrie 3D.

4.7 Moulage par transfert de résine de même qualité Processus (SQRTM)

La substitution du processus de durcissement conventionnel en autoclave par des processus hors autoclave (OoA) offre le potentiel d'augmenter la viabilité économique de la fabrication de composants plus gros. Au cours des dernières années, un certain nombre de ces procédés OoA ont été introduits sur le marché. Cependant, seuls quelques-uns d'entre eux peuvent rivaliser avec les procédés de moulage par transfert de résine de même qualification. Le moulage par transfert de résine (RTM) a été modifié et développé sous l'acronyme SQRTM afin que des composants de grande taille, complexes et de forme presque nette, par ex. par exemple, des toits de cabine d'hélicoptère, des volets d'atterrissage ou des traverses de plancher peuvent être fabriqués. Ici, les matériaux préimprégnés sont traités avec de la résine liquide en utilisant la technologie d'infusion. Ce procédé RTM pour les préimprégnés UD et textiles a été développé par Radius Engineering Inc., Salt Lake City/Utah, et est actuellement utilisé par plusieurs fabricants de composants aéronautiques, qui l'utilisent dans des versions modifiées ou étudient plus en détail sa mise en œuvre. [6-8]. Cette technologie produit des composants de haute qualité, de forme quasi nette, pour l'industrie aéronautique, sans utiliser d'autoclaves.

La différence fondamentale entre le SQRTM et les procédés d'injection de résine traditionnels (RTM) réside dans la superposition de préimprégnés UD ou de tissus ou de découpes de préimprégnés au lieu de la fabrication d'une préforme à partir de tissus secs.

Ici, les coupes sont drapées dans un outil RTM et pré-consolidées lorsque l'outil est fermé (généralement sous vide). Ensuite, la résine d'infusion est pompée dans l'outil RTM sous haute pression (environ 5 à 7 bars), exerçant ainsi une pression hydrostatique sur l'empilement de préimprégnés. Le but de la résine injectée n'est pas de mouiller le préimprégné, mais plutôt d'appliquer une pression uniforme pour obtenir une consolidation (comparable au durcissement en autoclave). Dans ce cas, la résine pour infusion peut être considérée comme un matériau auxiliaire et, dans certaines conditions, ne doit pas être à nouveau qualifiée, comme c'est par ailleurs obligatoire pour les matériaux utilisés dans les applications aéronautiques.

Les deux matériaux sont durcis ensemble, processus au cours duquel la résine d'infusion crée une surface uniforme et lisse sur la pile de préimprégnés. Cette technologie combine les avantages des matériaux préimprégnés, qui permettent une construction très légère, avec ceux des procédés d'infusion.

Avantages de SQRTM :

Il permet l'utilisation de résines modifiées par impact et d'autres résines spéciales

Les préimprégnés sont plus faciles à manipuler que les tissus secs

Une structure de couches établie et éprouvée peut être maintenue avec des préimprégnés

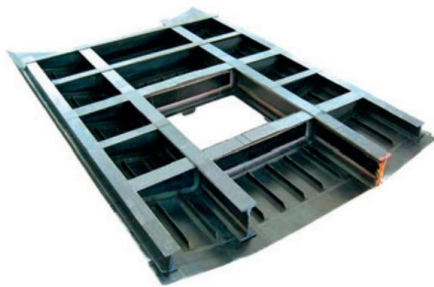
Des systèmes de préimprégnés et de résines d'infusion établis et compatibles peuvent être utilisés ; aucun processus de qualification de matériau supplémentaire requis

Les paramètres de processus et de processus (pression, température), l'épaisseur des composants et la teneur en volume de fibres sont plus faciles à contrôler

L'utilisation de presses chauffées permet des temps de durcissement plus courts (taux de chauffage et de refroidissement plus rapides)

Le durcissement hors autoclave est possible

Un avantage supplémentaire réside dans le fait que des structures plus grandes, telles que des volets d'atterrissage ou des stabilisateurs horizontaux, peuvent être fabriquées sous forme de composants intégrés (concept multi-spar), ce qui réduit considérablement les efforts d'assemblage. De tels composants devant être fabriqués dans un outil fermé, ils présentent leurs dimensions définitives (forme nette) après démoulage, de sorte que les éventuelles opérations d'usinage sont limitées à très peu de zones (ébavurage). Par conséquent, il est possible d'atteindre des niveaux de précision dimensionnelle avec les processus SQRTM difficiles à atteindre avec des composants préimprégnés fabriqués par durcissement en autoclave.



Graphique 4.57

Élément de toit d'hélicoptère de forme presque nette

[Autorisation : Radius Engineering Inc. ; Ville de Lac Salé [8]

4.8 Références

- [1] Brevet EP 1775108 B1 : Martinez Manuel Torres. Tête multi-applications pour bandes de fibres et méthode d'application desdites bandes de fibres. 2011.
- [2] Brevet US 20110088527 A1 : Martinez Manuel Torres. Système de coupe en bandes. 2011.
- [3] Brevet US 20080216961 A1 : Alexander Hamlyn, Yvan Hardy. Tête applicatrice de fibres avec systèmes de coupe et de verrouillage de fibres particulières. 2008.
- [4] Hauke Lengsfeld, Christopher Werner. Warmumformen statt Pressen. Kunststoffe. 2008, 3, 28-31.
- [5] Charles L. Tucker III. Formage de composites avancés, dans la fabrication de composites avancés. Timothy G. Gutowski (éd.). New York : John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [6] Sara Black, Jürgen Schreier. SQRTM ermöglicht die Fertigung endkonturnaher Teile aus Verbundwerkstoffen. Marché des machines. (En ligne) http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/kunststoffverarbeitung_gummiverarbeitung/articles/293002/index5.html (consulté le 16/05/2012).
- [7] Cédéric de Roover, Bertrand Vaneghem. Structure hautement intégrée fabriquée en une seule fois avec Ruban UD préimprégné. Revue JEC Composites. 2011, 62, 40-42.
- [8] Sarah Noir. SQRTM permet des pièces en forme de réseau. Composites hautes performances. Septembre 2010.

4.9 Informations supplémentaires

M. Flemming, G. Ziegmann, S. Roth. Faserverbundbauweisen — Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1999. ISBN 3-540-61659-4.

M. Flemming, G. Ziegmann, S. Roth. Faserverbundbauweisen — Halbzeuge und Bauweisen. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1996. ISBN 3-540-60616-5.

Brochure d'entreprise : assyst Bullmer GmbH et Gunnar/Weissenberger AG, 2012.

J. Sloan. Composites hautes performances. Monde des composites. Juillet 2008.

Frank Henning, Elvira Moeller. Manuel Leichtbau : Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Munich : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN : 978-3-446-42267-4.

Brevet EP 2305455 A1 : Martinez Manuel Torres. Système de coupe pour bandes. 2011.

Brevet US 20130111725 A1 : Martinez Manuel Torres. Tête d'application pour l'application de bandes de fibres. 2013.

Brevet EP 2036702 B1 : Alexander Hamlyn, Yvan Hardy. Machine d'application de fibres.

Brevet EP 2117818 B1 : Alexander Hamlyn, Yvan Hardy. Faserapplikationsmaschine mit flexiblen Faserzufuhrschläuchen.

Brevet EP 0361828 B1 : Jerry Dale Wisbey. Machine de placement de fibres et tête de placement de fibres. Cin-cinnati Milacron Inc.

Brevet US 8151854 B2 : Tino Oldani. Système de plate-forme de machine de placement de fibres comportant des ensembles de tête et de cantre interchangeables. Ingersoll Machines-outils, Inc.

Brevet EP 1922209 B1 : Russel C. Devlieg, Kenneth P. Zaballos. Dispositif de coupe de remorquage, système et procédé. La société Boeing.

Brevet US 8256484 B2 : Robert A. Kisch, Peter Vogeli, Kyle Jeffries, Russell DeVlieg. Effecteur final pour la construction d'éléments composites. La société Boeing.

Brevet WO 2008154269 A8 : Milo M. Vaniglia. Tête de coupe et d'alimentation motorisée. Cincinnati Machine, LLC. 2008.

Brevet US 5110395 A : Milo M. Vaniglia. Tête de placement de fibres. Cincinnati Milacron Inc.

Russell DeVlieg, Kyle Jeffries, Peter Vogeli. Placement de fibres à grande vitesse sur de grandes structures complexes. Electroimpact, Inc., Copyright © 2007 SAE International. Document n° 2007-01-3843.

Luis Izco, Javier Isturiz, Manu Motilva. Système de placement de remorquage à grande vitesse pour surfaces complexes avec capacités de coupe/serrage et de redémarrage à 85 m/min (3 350 IPM). 2006 SAE International, article n° 2006-01-3138.

Dirk H.-J. A. Lukaszewicz, Carwyn Ward, Kevin D. Potter. Les aspects techniques de la pose automatisée de pré-imprégnés : histoire, présent et futur. Composites Partie B : Ingénierie. 2012, 43, 997-1009.

Fives Machining Systems, Inc. www.fivesmsi.com (consulté le 12/06/2014).

Michael Chun-Yung Niu. Structures de cellule composites – Informations et données pratiques sur la conception. Hong Kong : Hong Kong Conmil Press LTD., 1992.

Brevet PCT WO 2006/069989 : Procédé de réalisation de trous d'allègement emboutis dans des zones planes de pièces composites pré-imprégnées. 2006.

Dave Regiec, Peter Vogli. Placement de fibres à grande vitesse sur de grandes structures complexes. Revue JEC Composites. 2012, 72, 41-43.

5

Technologies de durcissement

Felipe Wolff-Fabris

Le chapitre 4 a présenté les technologies appropriées pour former des matériaux préimprégnés. Une fois les opérations de formage terminées, elles sont suivies du processus de durcissement, qui utilise soit des autoclaves, soit des processus hors autoclave. Le durcissement d'un composant préimprégné est le résultat de réactions chimiques qui conduisent à la réticulation finale du système matriciel. L'énergie nécessaire pour initier la réticulation chimique peut être introduite de diverses manières, notamment par la chaleur, les ondes électromagnétiques ou le rayonnement d'un faisceau d'électrons.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principales technologies couramment utilisées pour durcir les préimprégnés. Les avantages et les inconvénients des processus individuels et l'effet de leurs paramètres de processus respectifs sur les caractéristiques des composants finaux seront discutés. La section suivante couvrira les principes fondamentaux du processus de durcissement, en particulier ceux cruciaux pour l'adaptation et l'optimisation des paramètres du processus.

5.1 Principes fondamentaux du cycle de durcissement

La réaction chimique des systèmes de résine courants a déjà été décrite au chapitre 2. Les systèmes conventionnels à durcissement thermique (par exemple, époxy-amine) peuvent fondamentalement être durcis en utilisant n'importe laquelle des technologies présentées ici. Seul le durcissement par faisceau d'électrons représente un cas particulier et nécessite des systèmes de résine spéciaux. Les réactions chimiques et les cycles de durcissement des préimprégnés durcissant par faisceau d'électrons seront discutés séparément dans la section 5.8. Dans ce qui suit, nous discuterons des aspects fondamentaux du cycle de durcissement des préimprégnés thermiquement durcis courants en ce qui concerne les technologies détaillées plus loin.

Les préimprégnés sont généralement transportés à -18°C et peuvent être stockés à cette température pendant des mois, voire des années, avant de commencer à durcir. Même à température ambiante, les préimprégnés réagissent relativement lentement ; ici, la durée de vie en pot peut atteindre plusieurs semaines. Le terme « durée de vie en pot » décrit la période de temps jusqu'à ce que le système ne soit plus exploitable.

en raison de sa viscosité accrue. Afin de durcir complètement les matériaux préimprégnés, des températures élevées doivent être maintenues pendant un certain temps. Les composants préimprégnés destinés à l'industrie aéronautique sont généralement durcis à 180 °C pendant plusieurs heures. Les températures élevées sont nécessaires pour initier et entretenir la réaction chimique. Idéalement, tous les groupes réactifs auront formé un point de réticulation une fois le cycle de durcissement terminé. Dans ce cas, le post-durcissement et les changements spectaculaires des caractéristiques qui en résultent au cours de la durée de vie du composant peuvent être exclus.

La séquence chronologique de température, et de pression le cas échéant, requise pour le durcissement d'un composant est également appelée cycle de durcissement. Compte tenu du fait que la productivité des procédés de fabrication des préimprégnés dépend largement du cycle de durcissement, celui-ci doit être aussi court que possible. Le cycle de durcissement est affecté par plusieurs aspects, notamment la chimie de la résine, l'utilisation d'accélérateurs et la température de durcissement. Les aspects chimiques de la réaction de durcissement, en fonction des résines et des agents de durcissement utilisés, ainsi que le changement de viscosité lors de la réticulation, ont déjà été discutés en détail au chapitre 2.

La figure 5.1 montre un cycle de durcissement typique pour les préimprégnés dans l'industrie aéronautique. Il s'agit de deux rampes de chauffe et de deux isothermes. Lors de la première rampe de chauffage, la viscosité de la résine diminue significativement et les réactions de réticulation ne se produisent pas encore. La température est ensuite maintenue à env. 115 à 140 °C. Dans cette région isotherme, la résine peut s'écouler et les substances volatiles se diffusent. Cette isotherme est également importante pour faciliter le chauffage homogène du préimprégné sur toute l'épaisseur du stratifié. En réponse à l'énergie thermique supplémentaire de la deuxième rampe de chauffage, la viscosité diminue encore davantage jusqu'à ce que la réaction de réticulation de la matrice soit initiée, augmentant rapidement la viscosité de la résine. Le processus de durcissement se poursuit pendant la deuxième isotherme. La résine liquide développe une structure semblable à un gel ; cette transition est également appelée gélification ou point de gel. La seconde isotherme doit être suffisamment longue pour faciliter la réaction de presque tous les groupes réactifs en points de réticulation.

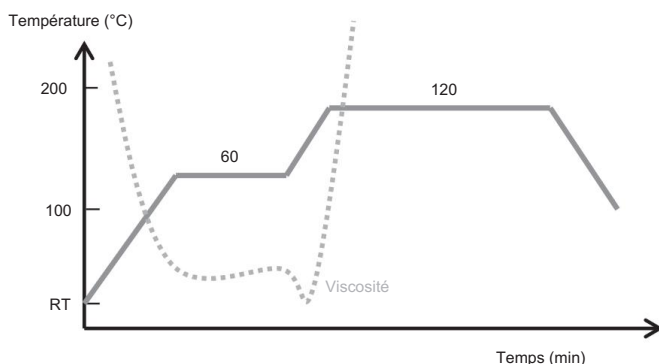


Figure 5.1 Cycle de durcissement typique des composants préimprégnés

Les réactions chimiques de durcissement des résines sont exothermiques (voir également le chapitre 2). Cela signifie que de la chaleur est dégagée pendant le durcissement, ce qui doit être pris en compte lors de la phase de chauffage. Si la rampe de chauffage est trop raide, la grande quantité de chaleur dégagée en peu de temps entraîne une forte augmentation de la température dans le stratifié. D'une part, cela peut conduire à une répartition non uniforme de la chaleur dans le composant et donc à une densité de réticulation inhomogène (= propriétés inhomogènes). En revanche, la température de décomposition de la matrice pourrait être dépassée, ce qui entraînerait une augmentation importante de la porosité et donc une perte dramatique des propriétés mécaniques. Le stratifié peut même brûler, ce qui aurait non seulement des conséquences économiques désastreuses, mais présenterait également un risque d'accident. La rampe de chauffage doit donc être adaptée aux préimprégnés utilisés ainsi qu'à l'épaisseur du composant.

Au cours de la première isotherme d'un cycle de durcissement, l'excès de résine est absorbé par ce que l'on appelle une « aide au saignement ». Le saignement pendant le durcissement d'un préimprégné décrit l'écoulement d'un excès de résine du composant. Ce processus peut être soutenu par une pression extérieure. L'écoulement de la résine pendant le cycle de durcissement est particulièrement important car il facilite l'élimination de l'air emprisonné et des substances volatiles du composant et la réduction de la porosité du stratifié. La fraction de résine qui s'échappe du stratifié dépend du temps et de la viscosité de la résine, qui à son tour dépend de la rampe de chauffage (Figure 5.2). Des viscosités plus faibles entraînent un écoulement de résine plus élevé, qui ne peut se produire qu'avant d'atteindre le point de gel. La réduction de la température du premier isotherme retarde la gélification de la résine (Figure 5.3), prolongeant ainsi la durée d'écoulement de la résine.

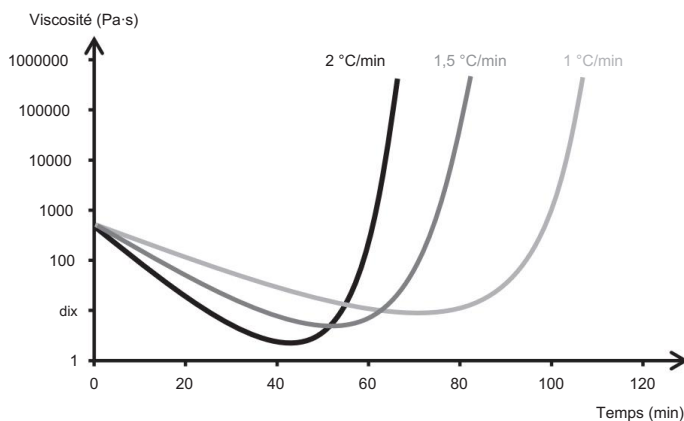


Figure 5.2 Effet de la rampe de chauffage sur la viscosité de la résine

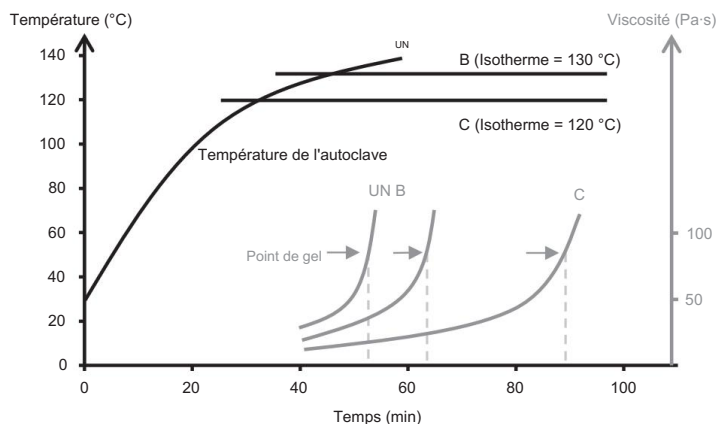


Figure 5.3 Effet des isothermes sur le point de gel [1]

Au cours des dernières années, des préimprégnés « à faible saignement » ont été introduits sur le marché. Ici, les saignements surviennent principalement lors de la première isotherme. La teneur en résine de ces nouveaux systèmes préimprégnés (appelés préimprégnés sans saignement) est ajustée avec précision pour correspondre à la teneur en volume de fibres souhaitée et à l'épaisseur de couche dans le composant final. Ainsi, il est possible de raccourcir, voire de supprimer, le premier isotherme, pour peu que la diffusion des volatiles soit assurée.

En règle générale, une conception de sac sous vide est utilisée pour durcir les préimprégnés à l'aide de technologies d'autoclave, de four, Quickstep™, de micro-ondes ou de faisceau d'électrons. Le vide garantit que l'air est retiré du préimprégné afin de réduire au maximum les défauts (porosités et délaminage). De plus, le sac sous vide retiendra l'excès de résine s'écoulant du stratifié.

L'utilisation de sacs sous vide permet d'augmenter la qualité des composants et d'améliorer leurs caractéristiques finales. La figure 5.4 montre un stratifié préimprégné dans un sac sous vide, ainsi que la conception schématique d'un sac sous vide.

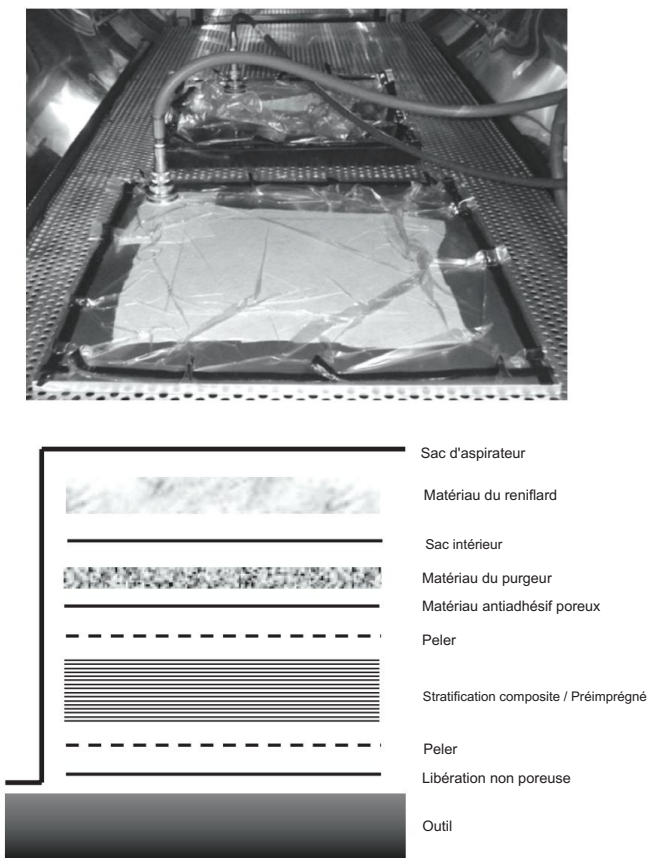


Figure 5.4 Conception typique d'un sac sous vide [Autorisation : SKZ — Das Kunststoff-Zentrum]

5.2 Durcissement en autoclave

La méthode la plus courante de durcissement des préimprégnés est l'utilisation d'autoclaves. Ils sont particulièrement avantageux pour la fabrication de composants de géométries variables, car la pression s'accumule de manière isostatique dans la chambre. Ainsi, les surfaces des composants sont exposées à des conditions identiques, indépendamment de leur taille et de leur géométrie. La taille de l'autoclave limite la taille maximale des composants pouvant être fabriqués à l'aide de cette technologie. Par exemple, un autoclave d'une longueur de 23 m et d'un diamètre de 9 m est utilisé pour la production de sections de fuselage du Boeing 787 Dream-liner.

Un autoclave typique se compose d'une chambre de pression, de systèmes de commande électriques et numériques, d'un générateur de gaz chauds et d'un système de vide (Figure 5.5). Un autoclave peut

accueillir et durcir des composants individuels de grande taille ou plusieurs petits composants. Par conséquent, les autoclaves présentent une grande flexibilité d'utilisation.



Graphique 5.5

Autoclave pour le durcissement de petits composants

[Autorisation : SKZ — Das Kunststoff-Zentrum]

Les exigences suivantes doivent être prises en compte lors du choix de la température et de la pression de durcissement :

1. La résine durcit de manière homogène et atteint le degré de réticulation souhaité dans les plus brefs délais.
2. La température maximale autorisée du matériau (= température de décomposition) ne doit être dépassée en aucun point du composant.
3. La pression de durcissement est suffisamment élevée pour permettre l'écoulement de l'excès de résine de toutes les couches préimprégnées.

Généralement, la pression à l'intérieur de l'autoclave est créée par un gaz inerte tel que le N₂.

ou CO₂. L'air peut également être utilisé ; cependant, cela augmente le risque d'incendie à des températures de durcissement élevées. En général, des pressions allant jusqu'à 7 bars sont utilisées pour consolider les pré-imprégnés et réduire la porosité. De plus, la température souhaitée dans le composant est atteinte plus rapidement à une pression plus élevée, car le transfert de chaleur par convection devient plus efficace à des pressions et des vitesses de gaz plus élevées et à une turbulence de gaz plus forte.

La pression crée également des forces de cisaillement qui augmentent le flux de résine et le mouillage des fibres. Tous ces facteurs affectent les améliorations des propriétés mécaniques du composant final.

Le transfert de pression dans le composant dépend de plusieurs paramètres, notamment la teneur en fibres, la configuration du stratifié et la conception du sac sous vide.

La figure 5.6 montre un profil de pression conventionnel pendant le cycle de durcissement dans un autoclave.

Lors de la première rampe de chauffe et de la première isotherme, le composant est initialement sous vide uniquement. Au début de la deuxième rampe de chauffage, la pression

La pression dans l'autoclave augmente tandis que le vide dans le sac sous vide diminue. Le principe actif de ce profil de pression est l'élimination des volatils et de l'air dès la fin de la première isotherme. Une pression supplémentaire de l'autoclave pendant ces étapes (1ère rampe de chauffage et 1ère isotherme) aurait un effet négatif, piégeant l'air et autres volatils. Après la première isotherme, la consolidation du composant commence avec la montée en pression ; elle est facilitée par les faibles viscosités de la résine.

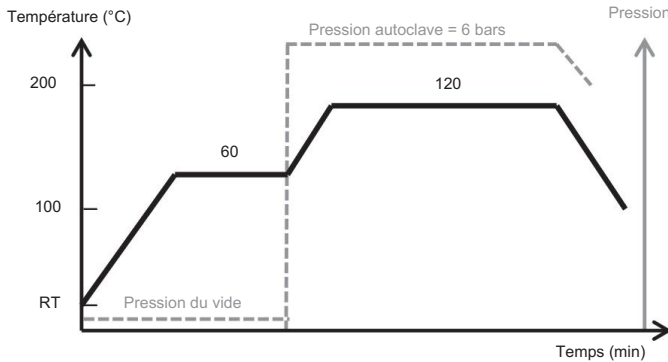


Figure 5.6 Profil de pression conventionnel pendant le durcissement en autoclave

Cependant, l'utilisation du profil de pression décrit ci-dessus n'est pas sans controverse dans la pratique. La consolidation de la résine ne peut pas être obtenue si la résine commence à gélifier lors de la première isotherme. La pression dans l'autoclave ne pourra alors pas réduire la porosité ni augmenter la qualité des composants. De plus, le chauffage sans pression des composants dans l'autoclave est plutôt inefficace, car le transfert de chaleur est meilleur avec une pression plus élevée dans l'autoclave (comme décrit ci-dessus). Un autre problème du profil de pression décrit est lié à la pression hydrostatique de la résine, qui représente la pression réelle dans la résine et diffère de la pression dans l'autoclave. La pression hydrostatique de la résine est inférieure à la pression de l'autoclave en raison de la capacité portante des fibres. Il détermine la solubilité des substances volatils dans la matrice. Si la pression hydrostatique est inférieure à la pression de vapeur des volatils, ceux-ci se séparent de la matrice et forment des porosités. Si les préimprégnés sont sous vide uniquement, c'est-à-dire, par exemple, il n'y a pas de pression d'autoclave, la pression hydrostatique de la résine est très faible voire négative. À des températures élevées et sur de longues périodes, ce sont des conditions idéales pour la formation de vides et de porosités [2]. Afin d'éviter ces problèmes, il est courant de créer une certaine pression dans l'autoclave (environ 60 à 85 % de la pression maximale) au début du cycle de durcissement. Cependant, la pression maximale n'est appliquée qu'après la première isotherme (Figure 5.7).

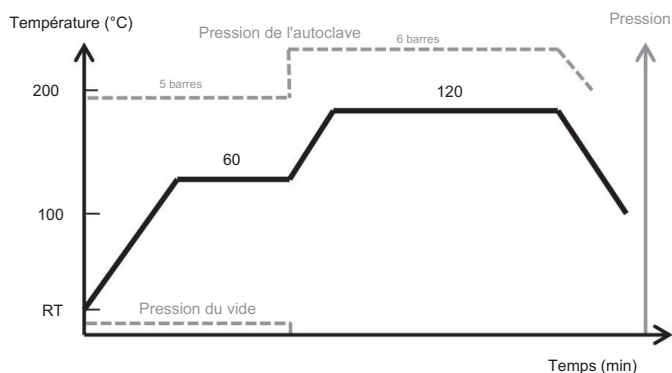


Figure 5.7 Profil de pression avec montée en pression au début du cycle de durcissement

Le moment de la montée en pression a un effet majeur sur les propriétés du composant final. La pression maximale doit être appliquée dès que la viscosité de la résine dans la couche supérieure est suffisamment faible pour faciliter l'écoulement de la résine. Si la pression est appliquée trop tôt, la perte de résine (des préimprégnés vers le sac sous vide) peut devenir trop élevée. Si la pression est appliquée trop tard, une viscosité élevée de la résine peut entraîner un écoulement insuffisant de la résine. Le timing correct pour l'application de la pression dépend également d'autres paramètres : il doit être précoce plus la pression de l'autoclave est élevée et plus la rampe de chauffage est raide [3].

Comparé à toutes les autres technologies de durcissement actuellement disponibles, le durcissement des préimprégnés dans un autoclave offre les meilleures propriétés mécaniques aux composants résultants. L'air ou les substances volatiles en solution ou piégés dans la matrice sont transportés plus efficacement vers la connexion sous vide. Le volume de gaz qui ne peut pas être éliminé du préimprégné est réduit proportionnellement à la pression appliquée. La pression du procédé augmente également la solubilité des substances volatiles dans la résine, ce qui réduit la porosité des composants.

Cependant, les coûts d'investissement et d'installation des autoclaves sont nettement plus élevés que ceux des autres technologies. L'effort manuel et les coûts d'outillage et d'exploitation élevés contribuent aux coûts de production élevés des composants durcis en autoclaves.

5.3 Durcissement au four

En général, un four n'est rien d'autre qu'un autoclave sans pression. Pour le durcissement au four, les préimprégnés sont à nouveau disposés dans un sac sous vide et durcis à haute température. Des fours à circulation d'air sont utilisés pour assurer une circulation de gaz suffisante nécessaire au chauffage uniforme des composants. La taille maximale des composants est déterminée par la taille du four.

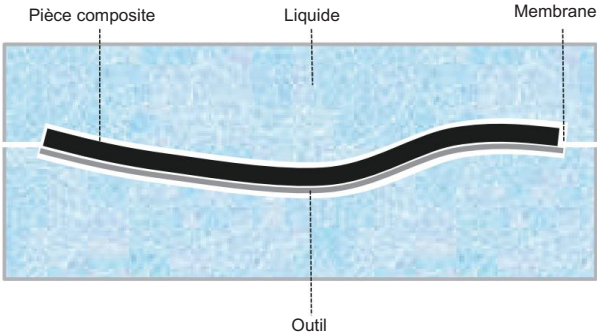
Les effets de la rampe de chauffage et de la température de durcissement sur la qualité des composants sont les mêmes que ceux décrits dans la section relative aux systèmes de durcissement en autoclave et ne seront donc pas abordés davantage ici. Comme mentionné précédemment, le transfert de chaleur par convection est moins efficace dans un état sans pression que sous une pression élevée. Par conséquent, le durcissement au four nécessite des temps de chauffage plus longs que les autoclaves. La répartition de la température dans un composant durci au four est également plus hétérogène.

La consolidation des préimprégnés dans un four se produit sous une pression normale (1 bar) et est considérablement inférieure à celle d'un autoclave. Le durcissement des préimprégnés conventionnels dans un four aboutit généralement à des composants aux propriétés mécaniques réduites. Les composants durcis au four présentent des porosités d'env. 5 à 10 %. Ces valeurs sont nettement supérieures à celles atteintes par les technologies d'autoclave (env. 1 à 2 %).

Cependant, les coûts de production des composants durcis au four sont nettement inférieurs à ceux du durcissement en autoclave en raison de leurs coûts d'investissement, d'installation et d'exploitation inférieurs. Ils sont la principale motivation des innombrables efforts de développement actuellement en cours dans le domaine du durcissement au four. Ces études se concentrent principalement sur de nouveaux systèmes de résine qui permettent un meilleur mouillage des fibres et une meilleure consolidation des composants sous pression normale. Par exemple, des systèmes de résine spéciaux à base de bisma-léimide (BMI) qui présentent d'excellentes propriétés mécaniques et des porosités nettement inférieures sont actuellement testés pour les applications de durcissement au four [4].

5.4 Technologie QuickstepTM

La convection (air ou gaz inerte) est le principal mécanisme de transfert de chaleur dans les autoclaves et les fours. La rampe de chauffage est plutôt limitée par la faible conductivité thermique des gaz, ce qui entraîne des cycles de durcissement plus longs. La technologie QuickstepTM utilise un liquide plutôt qu'un gaz comme échangeur de chaleur, comme le montre schématiquement la figure 5.8. Une membrane flexible sépare le composant du liquide.



Graphique 5.8
Schéma de QuickstepTM
technologie

La technologie Quickstep™ permet des rampes de chauffage et de refroidissement plus raides (jusqu'à 20 °C/min) que celles réalisables en utilisant des gaz (autoclaves ou fours), car la conductivité thermique offerte par les liquides est plus élevée. Ainsi, les cycles de durcissement deviennent plus courts tandis que les étapes isothermes restent identiques à celles requises pour les procédés en autoclave et en four [5], comme le montre la figure 5.9. Réductions du temps de cycle d'env. 43 % d'un composant préimprégné typique ont été rapportés pour cette technologie [6].

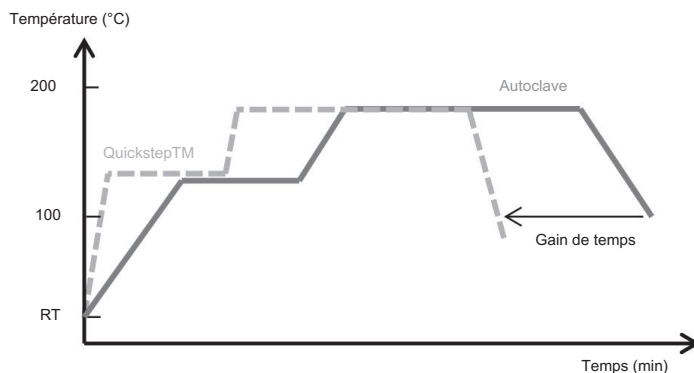


Figure 5.9 Schéma des cycles de durcissement pour l'autoclave et la technologie Quickstep™

Un autre avantage de la technologie Quickstep™ par rapport aux technologies d'autoclave et de four est le fait que le risque de décomposition thermique pendant le cycle de durcissement est réduit. La chaleur dégagée par le composant par la réaction de réticulation exothermique peut être efficacement échangée à travers le liquide.

Avec des rampes de chauffage plus raides, la viscosité de la résine diminue et, comme la technologie Quick-step™ facilite un chauffage rapide, la viscosité de la résine est proportionnellement plus faible. Il en résulte un meilleur mouillage des fibres et une plus forte adhésion fibre-matrice.

Bien qu'il soit possible de générer une pression à travers le liquide, la pression différentielle réalisable n'atteint qu'env. 0,1 à 0,3 bars. En conséquence, les couches préimprégnées ne sont pas aussi bien consolidées, ce qui conduit à des propriétés mécaniques réduites par rapport à celles obtenues avec un durcissement en autoclave. De plus, les membranes flexibles utilisées avec la technologie Quickstep™ limitent le type de composants pouvant être traités à ceux ayant des géométries relativement simples.

5.5 Processus de moulage/formage sous presse

Avec les processus de moulage/formage sous presse, des couches préimprégnées individuelles ou un composant stratifié qui n'a pas encore été durci sont placés directement dans un outil, après quoi la presse est fermée. Ici, le transfert de chaleur est très efficace, car il y a un contact direct entre l'outil chauffé et le stratifié. L'outil se compose de deux parties (femelle/partie positive et partie mâle/négative) et est généralement en métal moulé. La distance entre les deux pièces définit l'épaisseur du composant. La figure 5.10 montre une presse et l'outil correspondant pour la fabrication d'une coque préimprégnée.

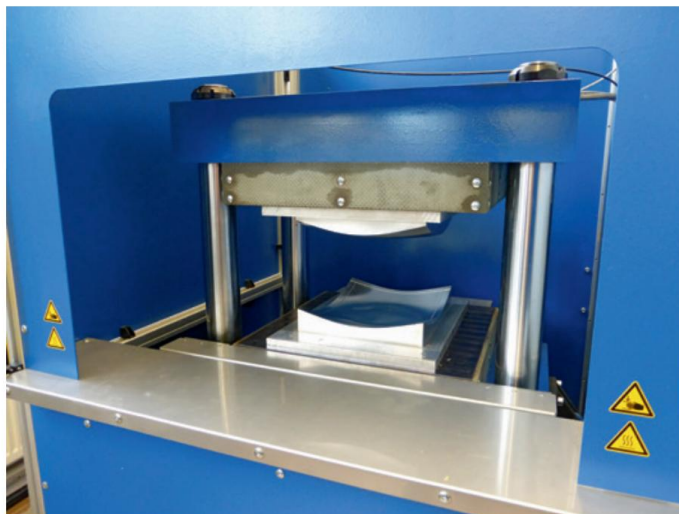


Figure 5.10 Moulage sous presse pour la fabrication de composants renforcés de fibres
[Autorisation : SKZ — Das Kunststoff-Zentrum]

La pression hydraulique est utilisée pour consolider le stratifié. La température requise pour initier le durcissement du composant peut être introduite par différents moyens, notamment des cartouches chauffantes électriques ou de la vapeur d'eau. Les préimprégnés sont en contact direct avec la surface de l'outil à température contrôlée, le transfert de chaleur est donc ici plus rapide que dans les processus basés sur la convection, tels que l'autoclave et le four.

Généralement, les cycles isothermes sont préférés pour le durcissement des préimprégnés, car les outils de presse présentent une inertie thermique élevée et rendent difficile (et coûteuse) la mise en œuvre de rampes rapides de chauffage et de refroidissement.

Les processus de pressage/formage permettent des tolérances de composants très étroites. Ils facilitent également un degré élevé d'automatisation. Les cycles de durcissement peuvent être tracés et contrôlés avec précision, ce qui permet la fabrication de composants de haute qualité et reproductibilité. Des pressions d'outil très élevées (30 à 60 bars) peuvent être atteintes, ce qui

se traduit par une excellente consolidation des composants et une faible porosité. Par conséquent, les propriétés mécaniques présentées par les composants fabriqués par moulage sous pression/ les processus de formage sont très bons.

En raison de leurs coûts d'investissement et d'outillage élevés, les procédés de moulage sous presse sont particulièrement adaptés à la fabrication de pièces en grand volume et à cadence de production élevée. Pour les petites séries de production, des outils en plastique renforcé de fibres ou en nickel électroformé peuvent être utilisés.

Les inconvénients de cette technologie incluent les limitations de la géométrie des composants et le manque de flexibilité. Même de petits changements dans la conception des composants nécessitent la fabrication de nouveaux outils, ce qui entraîne des coûts d'investissement élevés.

5.6 Processus d'induction

La technologie de durcissement par induction est un dérivé des processus de moulage sous presse et est commercialisée par RocTool, SA, sous les noms commerciaux Cage System® et 3iTech®. Les procédés par induction utilisent également une presse, mais en termes de technologie d'outillage, il existe des différences majeures par rapport aux procédés de formage par presse conventionnels. L'induction ne chauffera que la surface de l'outil coulé et les canaux d'eau de refroidissement sont également placés à proximité de la surface de l'outil, ce qui facilite un refroidissement rapide du composant.

Chauffer et refroidir uniquement la surface de l'outil de coulée rend les processus d'induction plutôt économes en énergie. La surface de l'outil est chauffée par induction électromagnétique [7], ce qui permet des rampes de chauffage allant jusqu'à 5 à 10 °C/s (300 à 600 °C/min). Une bobine d'induction placée autour de l'outil génère un champ électrique et induit une boucle électrique dans chaque moitié de l'outil, comme le montre la figure 5.11. Le passage du courant dans les conducteurs électriques crée de la chaleur (effet Joule).

Le courant traverse toute la surface de l'outil ; cependant, le chauffage n'est souhaité que dans les parties de l'outil qui sont en contact direct avec le stratifié à durcir. Par conséquent, les surfaces extérieures de l'outil sont recouvertes d'un métal qui présente un faible effet Joule. Ici, le cuivre est généralement utilisé en raison de sa conductivité électrique élevée et de son comportement non magnétique.

Sur la surface de l'outil, un fort effet Joule est nécessaire pour un chauffage rapide ; par conséquent, un matériau à haute résistivité électrique est utilisé ici. De plus, le matériau doit présenter une perméabilité magnétique relativement élevée, car cela se traduit par des performances relatives élevées de l'outil, c'est-à-dire en termes de résistance à l'usure. c'est-à-dire que le matériau chauffe dans des champs magnétiques relativement faibles. Les matériaux préférés pour la surface des outils sont les alliages d'acier avec des indices de perméabilité $\mu_r = 50$ ou plus [8].

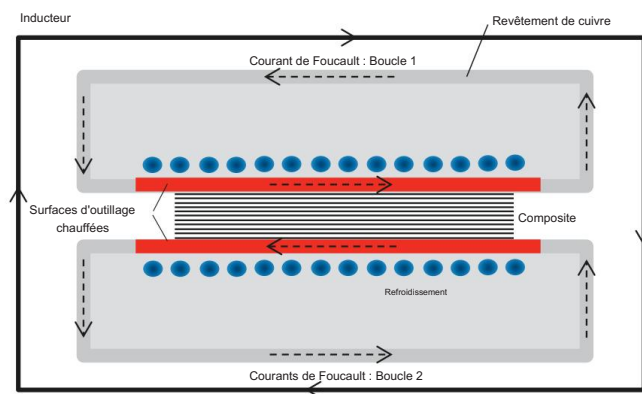


Figure 5.11 Configuration schématique d'un outil de processus d'induction

Tout comme les procédés de formage sous presse, les technologies de durcissement par induction sont utilisées pour les moyennes et grandes séries de production. Même de petites modifications dans la conception des outils sont presque impossibles en raison du positionnement des canaux de refroidissement. De plus, seuls les composants présentant des géométries très simples (encore plus simples que pour les procédés de formage sous presse) peuvent être fabriqués par durcissement par induction. Si les composants avaient des géométries plus complexes, la répartition de la température à la surface de l'outil serait inhomogène, ce qui entraînerait un durcissement inhomogène des couches préimprégnées.

Les principaux avantages de cette technologie, par rapport aux technologies de presse, sont son efficacité énergétique (seule la surface de l'outil est chauffée) et la possibilité de chauffer très rapidement la surface de l'outil. Avec l'outil d'induction monté dans une presse, il est possible de fabriquer des composants avec des degrés de consolidation élevés et une faible porosité.

5.7 Durcissement par micro-ondes

Les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques à haute fréquence qui suivent l'équation de Maxwell, de la même manière que la lumière. Les micro-ondes sont définies comme la plage de fréquences comprise entre env. 108 et 1012 Hz dans le spectre électromagnétique et la technologie de durcissement par micro-ondes ont établi une fréquence standard de 2,45 GHz.

Différents matériaux absorbent et réfléchissent les micro-ondes à différents niveaux. L'absorption des micro-ondes, et donc l'échauffement d'un matériau, repose principalement sur deux mécanismes. D'une part, les charges libres sont capables d'absorber les micro-ondes par induction. La formation de courants de Foucault crée de la chaleur qui se propage à travers le matériau irradié. Ce mécanisme est observé dans les métaux, les semi-conducteurs et les solutions contenant des ions libres. D'autre part, les molécules polaires, qui sont intrinsèquement

Sitiquement neutre, il réagit à l'irradiation micro-ondes en oscillant constamment avec le champ alternatif, provoquant ainsi un frottement intramoléculaire. Les matériaux présentant ce comportement comprennent l'eau et divers plastiques. L'effet de création de chaleur par friction intramoléculaire dans un champ électrique est également appelé perte diélectrique. Plus la perte diélectrique est élevée, plus la réaction du matériau à l'exposition aux micro-ondes est prononcée et plus la profondeur de pénétration est faible.

La génération de champs électromagnétiques uniformes et homogènes est un défi majeur pour la technologie des procédés micro-ondes, mais il s'agit en même temps d'une condition préalable technique pour de nombreuses applications industrielles. Dans un four à micro-ondes de cuisine classique, le contenu à chauffer est mis en rotation pour compenser l'inhomogénéité du champ électromagnétique. Cependant, dans de nombreuses applications techniques, cela n'est pas possible, et parfois même indésirable. Les fours à micro-ondes industriels utilisent plusieurs magnétrons qui s'allument et s'éteignent successivement afin de générer un champ électromagnétique homogène. En d'autres termes, c'est ici le champ électromagnétique qui tourne plutôt que le composant. Cette technologie est commercialisée par Vötsch Industrietechnik GmbH, Allemagne, sous le nom commercial Hephaistos Microwave System (Figure 5.12). Les structures d'ondes stationnaires sont considérablement réduites grâce à un applicateur hexagonal doté d'un total de 24 magnétrons. L'homogénéité exceptionnelle du champ est obtenue principalement par la géométrie du four.



Figure 5.12 Système à micro-ondes Hephaistos pour le durcissement de composants renforcés de fibres

La perte diélectrique des systèmes de résine est juste suffisante pour assurer une bonne réponse aux micro-ondes. Avec la réaction de durcissement continue, la réactivité aux micro-ondes diminuera. Cela signifie qu'à puissance micro-onde constante, l'échauffement du matériau diminuera avec le temps (à mesure que la réaction se déroule). Cet effet fournit une « auto-protection » contre

surchauffe de la résine et permet des réactions de durcissement homogènes. La figure 5.13 montre les facteurs de perte diélectrique pour divers matériaux.

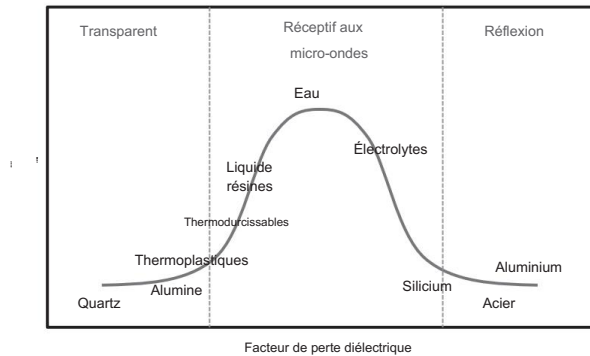


Figure 5.13 Les résines présentent des facteurs de perte diélectrique plus élevés que les thermodurcissables [9]

Par rapport aux technologies de durcissement en autoclave et au four, le principal avantage du durcissement par micro-ondes est le fait qu'il ne chauffe que le composant tandis que l'environnement reste à température ambiante. Cela en fait un processus économe en énergie avec des coûts énergétiques nettement inférieurs à ceux du durcissement en autoclave. Le procédé permet également des rampes de chauffage allant jusqu'à 100 °C/min. Un refroidissement actif du composant n'est toutefois pas possible.

Un problème général couramment observé dans les stratifiés durcis au four est également observé lors de l'utilisation du durcissement par micro-ondes. Parce que les composants ne sont pas sous pression pendant le durcissement, ils présentent une porosité élevée et les propriétés mécaniques des composants durcis aux micro-ondes sont donc inférieures à celles des composants durcis en autoclave [10].

Les coins et les bords subissent des taux de chauffage plus élevés car l'énergie introduite dans le matériau dépend de la zone irradiée. Les thermocouples peuvent également entraîner des variations de température, un fait à prendre en compte en particulier lorsque des répartitions de chaleur très homogènes sont requises. Les préimprégnés disponibles dans le commerce peuvent être durcis à l'aide de micro-ondes ; cependant, pour les composants hautes performances qui nécessitent des profils de durcissement très homogènes, le processus doit encore être développé. À l'heure actuelle, le durcissement par micro-ondes ne s'est pas encore imposé.

5.8 Durcissement par faisceau d'électrons

Dans le domaine des technologies de fabrication, un processus non thermique hors autoclave avec des temps de durcissement considérablement réduits promet le plus grand potentiel de réduction des coûts. Sur le plan technique, le durcissement par faisceau électronique des composites renforcés de fibres offre la meilleure chance de durcir les composants renforcés de fibres en quelques minutes à température ambiante.

La photochimie (absorption de la lumière et du rayonnement UV) repose sur l'interaction entre un photon et un atome ou une molécule. L'interaction excite un électron de valence et l'élève à un niveau d'énergie plus élevé. Le rayonnement d'un faisceau d'électrons à haute énergie peut même éliminer complètement les électrons d'un atome ou d'une molécule et ainsi créer des ions ou des radicaux qui facilitent les réactions chimiques/réticulations. Bien que le durcissement UV des résines époxy pour revêtements soit un processus techniquement établi, il est limité aux composants minces avec de faibles niveaux de charge. Les composants renforcés de fibres ne peuvent pas être fabriqués par durcissement UV. Cependant, le rayonnement du faisceau électronique, avec son niveau d'énergie plus élevé, constitue un processus approprié pour initier et favoriser les réactions de durcissement des composants renforcés par des fibres. Les composants d'une épaisseur allant jusqu'à 30 mm peuvent être durcis grâce à ce procédé.

Les systèmes de réticulation aux amines à durcissement thermique sont à la pointe de la technologie dans la fabrication de matériaux renforcés de fibres. Contrairement au mécanisme par étapes des réactions thermiques, la réaction de réticulation des résines époxy induite photochimiquement est une réaction en chaîne (initiée par un photoinitiateur). Les résines époxy se réticulent via un mécanisme de réaction en chaîne cationique ou via un mécanisme de réaction en chaîne combiné cationique/radicalaire.

La polymérisation cationique est une « réaction en chaîne » et se déroule donc à des vitesses plus élevées que les « réactions par étapes ». Un composant durcira en quelques minutes seulement, comparativement aux heures requises pour les systèmes conventionnels thermiquement réactifs. Le macro-cation en croissance subit des réactions d'extension de chaîne avec les monomères. La vitesse de cette réaction est déterminée par l'interaction entre l'extrémité de la chaîne ionique et le contre-ion respectif. Les vitesses de réaction rapides des réactions de réticulation induites par un faisceau d'électrons sont le résultat de l'atteinte rapide du point de gel. Le manque d'énergie thermique et la formation de macromolécules provoquent une augmentation rapide de la viscosité et donc une restriction précoce de la diffusion. Hormis pour les processus de durcissement thermique, la littérature ne fournit pas encore de données concernant le développement de la viscosité pendant le durcissement par faisceau d'électrons.

La réaction de réticulation se déroule au cours de trois étapes réactionnelles [11]

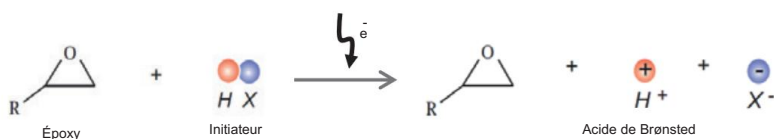
(Figure 5.14) :

- a) Formation d'acide de Brønsted : Afin d'initier la polymérisation, il est nécessaire de former un acide de Brønsted par impact énergétique (via des photoinitiateurs). La formation de l'acide de Brønsted est la partie caractéristique du durcissement par faisceau d'électrons, car

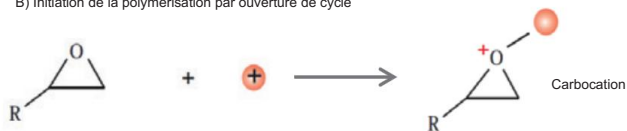
seule cette sous-réaction nécessite une irradiation électronique. En théorie, toutes les autres réactions se déroulent indépendamment de l'irradiation.

- b) Initiation de la polymérisation par ouverture de cycle : La polymérisation cationique est initiée par la réaction entre des initiateurs électrophiles avec des monomères qui agissent comme donneurs d'électrons. Dans le cas du durcissement par faisceau électronique de résines époxy, l'acide de Brønsted agit comme initiateur électrophile. Il s'agit donc ici du véritable initiateur de la réticulation cationique. Les ions hydrogène actif de l'acide de Brønsted provoquent la protonation du cycle époxy et initient ainsi la polymérisation par ouverture de cycle.
- c) Croissance et terminaison de chaîne : Dans le cas le plus simple, les réactions de polymérisation cationique se propagent par l'ajout répété de macromolécules à des carbocations ou à des ions onium tout en préservant le caractère ionique. Les réactions de polymérisation cationique sont caractérisées par de nombreuses réactions de terminaison et de transfert. L'une des réactions de terminaison les plus importantes est le résultat des interactions entre la chaîne polymère en croissance et l'eau ou les alcools. Les deux contaminations agissent comme des terminateurs de chaîne en raison de leurs groupes hydroxyle (R-OH).

A) Formation d'acide de Brønsted



B) Initiation de la polymérisation par ouverture de cycle



C) Croissance et terminaison de la chaîne

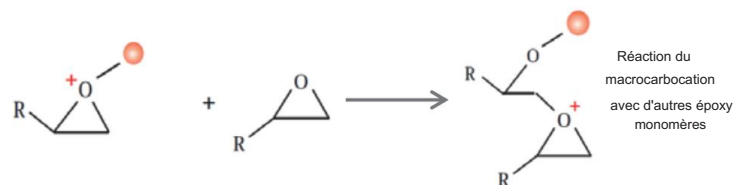


Figure 5.14 Processus schématique de durcissement par faisceau électronique de résines époxy

Le durcissement par faisceau d'électrons non thermique hors autoclave offre les avantages suivants par rapport à la technologie de l'autoclave [12] :

Réduction des coûts de processus grâce à un temps de réticulation plus court et à l'élimination de la technologie des autoclaves. La littérature fait état d'un potentiel d'économies globales de 10 à 40 %.

Le durcissement par faisceau d'électrons permet la fabrication de composants plus grands car la taille du composant n'est plus limitée par la taille de l'autoclave, mais uniquement par la taille du chariot de transport utilisé pour transporter le composant à travers la ligne de faisceau d'électrons. L'augmentation de la taille de ce chariot est plus rentable que l'augmentation de la taille d'un autoclave.

Le durcissement ne nécessite pas les températures élevées autrement nécessaires pour que les composants puissent être durcis à température ambiante. Le composant subit donc des charges thermiques plus faibles, ce qui réduit à son tour la formation de contraintes résiduelles d'origine thermique dans le composant. Le durcissement à température ambiante facilite également l'utilisation de matériaux d'outils moins chers, comme le bois ou le plastique.

L'irradiation et le durcissement des composants par des technologies de faisceaux d'électrons ont lieu dans des installations spécialement conçues qui présentent des efficacités de rayonnement allant jusqu'à 10 MeV. La figure 5.15 décrit schématiquement une ligne de faisceau électronique.

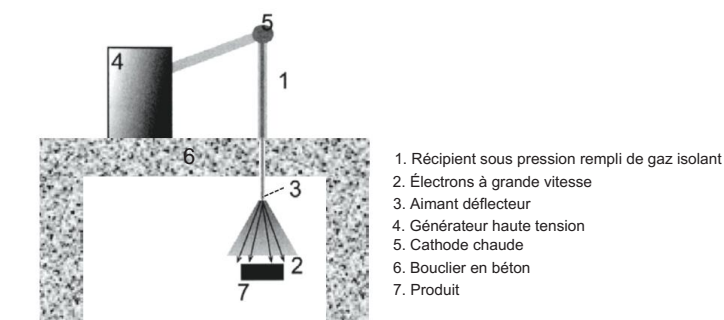


Figure 5.15 Schéma d'une ligne de faisceau d'électrons pour le durcissement de composants renforcés par des fibres

Dans une étude, l'efficacité énergétique d'une ligne de faisceaux d'électrons de 50 kW avec une dose de durcissement de 100 kGy et une exposition au faisceau d'électrons de 70 % a été comparée à celle d'un autoclave conventionnel [13]. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.1. La consommation d'énergie d'un accélérateur typique utilisé pour le durcissement de matériaux renforcés de fibres n'est que d'env. 10 % de l'énergie nécessaire au durcissement en autoclave (durée de cycle : 4 h).

Tableau 5.1 Efficacité énergétique de l'accélérateur d'électrons par rapport aux autoclaves traditionnels [13]

Type d'équipement	Spécification de l'équipement	Énergie totale (kW/h)	Capacité (kg/h)	Efficacité énergétique (kWh/kg)
Faisceau d'électrons de 10 MeV	50 kW	400	1800	0,22
Autoclave	12,2 m de longueur 2,4 mètres de diamètre	480	273	1,76
Autoclave	15,2 m de longueur 7,6 mètres de diamètre	7660	2730	2,81

Les préimprégnés conventionnels à durcissement thermique à base de systèmes époxy-amine ne peuvent pas être durcis par rayonnement électronique. Ce procédé utilise des systèmes de résine spécialement développés à base de résines époxy et de photoinitiateurs (environ 1 à 3 % en poids). Les préimprégnés durcissables par faisceau d'électrons ont été testés pour la première fois dans les années 1990 pour des applications militaires [14].

En 2001, Air Canada a utilisé le durcissement par faisceau électronique de préimprégnés pour réparer les carénages de l'avion cargo Airbus A320. Ici, des plis préimprégnés ont été posés et compactés sur la pièce à réparer. Un sac sous vide a été utilisé pour éliminer l'air entre les plis. Ensuite, l'empilement a été durci par irradiation par faisceau électronique.

Bien que le durcissement par faisceau d'électrons offre un certain nombre d'avantages par rapport au durcissement en autoclave, cette technologie n'est pas encore prête à être commercialisée. D'un point de vue matériel, l'une des raisons est le fait que leurs densités de réticulation élevées donnent des thermodurcissables durcis par faisceau d'électrons présentant une très faible ténacité à la rupture. De plus, le degré de mouillage des fibres est insuffisant en raison de la réaction de durcissement rapide, ce qui rend difficile l'obtention d'une forte adhésion fibre/matrice. Les propriétés mécaniques des composants durcis par faisceau d'électrons ne correspondent pas à celles des composants durcis en autoclave. Le processus relativement complexe nécessite une connaissance approfondie de l'effet d'une variété de paramètres (tels que la dose, l'énergie, le nombre de passages, la durée et la vitesse d'irradiation) sur le processus de durcissement, qui jusqu'à présent n'a été étudié que dans quelques rares cas. études [15]. L'état actuel de la technologie de durcissement par faisceau d'électrons nécessite une recherche et un développement technologique intensifs.

5.9 Références

- [1] D. Purslaw, R. Childs. Matériaux composites. 1986, 17, p. 757.
- [2] F.C. Campbell. Processus de fabrication des composites avancés. Oxford : Elsevier, 2004.
- [3] P.K. Mallick. Composites renforcés de fibres : matériaux, fabrication et conception. Boca Raton : CRC Presse, 2008.
- [4] C. Ridgard, J. Russell. Résines hautes performances 2011/Points forts. Composites hautes performances. 2011, novembre, p. 30-32.
- [5] V. Coenen, M. Hatrick, H. Law, D. Brosius, A. Nesbitt, D. Bond. Une étude de faisabilité du traitement Quickstep d'un matériau composite aérospace. Paris : Conférence internationale SAMPE Europe, 2005.
- [6] M. Kaiser, C. Garschke, B. Fox, C. Weimer, K. Drechsler. Fabrication hors autoclave de matériaux composites structuraux aérospace. Paris : Conférence internationale SAMPE Europe, 2007.
- [7] D. Vink. Induktionsheizung: Highspeed-Werkzeugtemperierung für Qualitätsteile. (En ligne) (consulté le 26 novembre 2012) http://www.industrieanzeiger.de/erp/-/article/32571342/37715087/Mit-Induktion-zu-Hochglanz/art_co_INSTANCE_0000/maximized/ (consulté le 14/06/2014).
- [8] RocTool. Modélisation du chauffage inductif avec un matériau à température contrôlée. Paris : COMSOL Multi-Conférence des utilisateurs de physique, 2005.
- [9] E. T. Thostenson, T. W. Choud, Composites Part A. 1999, 30, pp.
- [10] C. Nightingale, R.J. Day. Propriétés de résistance à la flexion et au cisaillement interlaminaire de la fibre de carbone/Composites époxy durcis thermiquement et par rayonnement micro-ondes. Composites partie A. 2002, 33, pp.
- [11] F. Wolff-Fabris, V. Altstädt, U. Arnold, M. Döring. Durcissement par faisceau d'électrons des composites. Munich : Carl Hanser Verlag, 2011.
- [12] A.J. Berejka. Physique et chimie des rayonnements. 2002, 63, p. 551.
- [13] V.S. Ivanov. Chimie des rayonnements des polymères. Utrecht : VSP BV, 1992.
- [14] J.D. Farmer, C.J. Janke. Le durcissement par faisceau d'électrons des préimprégnés de fibre de verre/époxy — Rapport final. Oak Ridge : Bureau du programme Advanced Composite de l'USAF, Laboratoire national d'Oak Ridge et Énergie atomique du Canada Ltd.
- [15] F. Wolff-Fabris. Modification de la ténacité des matrices époxy durcissables par faisceau d'électrons pour les composites en fibre de carbone. Bayreuth : Département des matériaux polymères, Université de Bayreuth, 2009.

6

Technologie d'outillage

Hauke Lengsfeld et Hilmar Apmann

Ce chapitre décrira l'outillage utilisé et les concepts sous-jacents à la formation et au durcissement des préimprégnés. Des concepts exemplaires seront expliqués en détail pour illustrer les différences dans les exigences.

Les préimprégnés sont des produits semi-finis bidimensionnels livrés au fabricant sous forme de rouleaux. Il faut des outils dimensionnellement stables pour transférer ces matériaux souples dans un contour prédéterminé et les durcir. En principe, le matériau renforcé de fibres est généré au moment où la matrice (résine) et les fibres sont mises en contact, c'est-à-dire au moment où la matrice (résine) et les fibres sont mises en contact. c'est-à-dire que le fabricant crée le matériau tout en le transformant. L'opération de formage s'effectue pratiquement in situ avec la création du matériau, ce qui représente la différence fondamentale par rapport aux matériaux conventionnels, comme le bois ou les métaux. Bien que ces matériaux puissent également être formés par des outils appropriés, ils ne sont pas créés au cours de ce processus. La précision et la reproductibilité de l'opération de formage affectent considérablement les performances des matériaux renforcés par des fibres, car même des perturbations mineures dans l'orientation des fibres ou dans les porosités conduisent à une résistance et une rigidité réduites du matériau.

Le terme « outillage » est souvent utilisé en relation avec la fabrication de composants renforcés par des fibres et décrit les outils qui forment le composant pendant son durcissement.

La figure 6.1, à gauche, montre un exemple d'outillage utilisé pour la fabrication de composants renforcés de fibres à partir de préimprégnés, entre autres matériaux. L'opération de formage commence par la découpe des préimprégnés et se poursuit par le formage à chaud et le durcissement ultérieur (Section 4.6). Dans certaines applications, des outils spécifiques sont utilisés pour positionner correctement les plis préimprégnés. Les outils sont utilisés dans les différentes industries qui traitent et utilisent des matériaux composites et préimprégnés (Figure 6.1, à droite).

Le choix de l'outillage dépend de la technologie de traitement, du nombre d'unités et de la taille des composants à produire. Il faut également tenir compte des exigences en matière de qualité de surface et de précision dimensionnelle. Les applications d'outillage pour la fabrication de composants composites comprennent les industries de l'aérospatiale, de l'énergie éolienne, de la construction navale et de l'automobile (Figure 6.1).

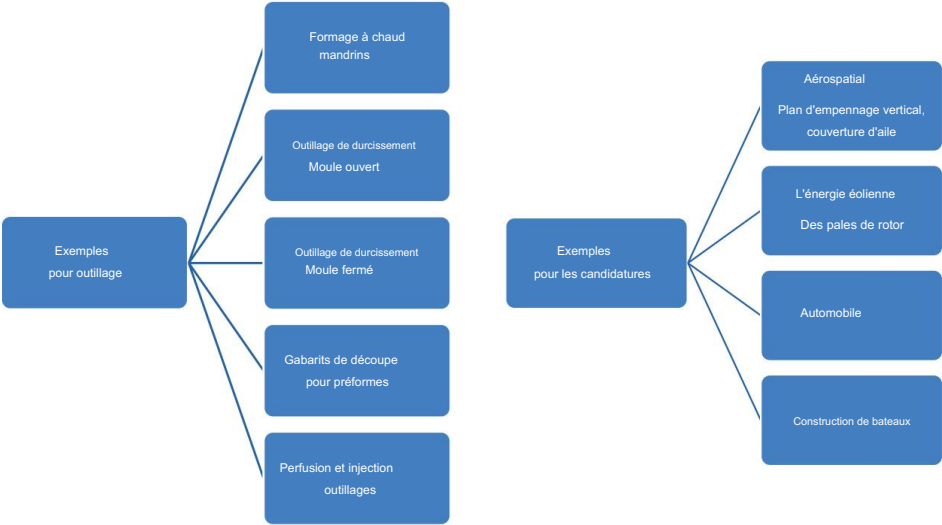


Figure 6.1 Exemples d'outillages (à gauche) et d'applications (à droite)

6.1 Exigences

Les outils pour le traitement des matériaux préimprégnés doivent répondre à un certain nombre d'exigences et de caractéristiques essentielles pour garantir la fabrication de composants composites de haute qualité.

Le tableau 6.1 répertorie les exigences et caractéristiques essentielles.

Tableau 6.1 Exigences et caractéristiques des outils préimprégnés

Exigences	Caractéristiques de l'outillage
Caractéristiques thermiques : convec- transfert de chaleur efficace dans le lami- nate devrait être rapide et efficace	Capacité thermique de préférence faible pour des cycles de durcissement courts Outils à parois fines
Précision des contours dans les conditions du processus	Matériau à faible dilatation thermique ou outillage avec changement de géométrie précalculé en raison de la dilatation thermique
Haute qualité de surface de l'outillage et de la pièce composite	Surfaces d'outillage résistantes à l'usure pour plus de durabilité Bonnes caractéristiques de démoulage
Bonne qualité de stratifié (sans vide)	Étanche en permanence au vide
Bonnes caractéristiques de manipulation	Nettoyage facile Réparabilité Faible poids
Rentabilité	Faible coût de fabrication des outillages Bonne disponibilité du matériel d'outillage Haute durabilité sous charge cyclique de température et de pression

Les caractéristiques thermiques d'un outillage utilisé pour le durcissement des préimprégnés affectent non seulement la qualité du stratifié, mais également le temps requis pour le durcissement, par ex. par exemple, dans un autoclave. Plus l'outillage est lourd, plus la masse thermique d'inertie est élevée pendant la période de chauffe. Cela entraîne un chauffage plus lent de l'outillage et du composant. Le matériau de l'outillage détermine également le transfert de chaleur dans le stratifié. Il est donc approprié d'utiliser un outillage léger et/ou à paroi mince afin de maintenir le cycle de durcissement court et plus rentable.

La précision du contour d'un outillage pendant le processus de durcissement est la caractéristique la plus cruciale pour garantir la fabrication de composants composites de haute qualité. Cela implique que les dimensions de l'outillage ne peuvent changer que dans des limites définies pendant les phases de durcissement et de refroidissement. Les changements dimensionnels dépendent du matériau utilisé et de son coefficient de dilatation thermique, CTE. Par conséquent, le comportement de dilatation thermique de l'outillage et du composant doit être étroitement aligné. Sinon, le composant (lors d'un état de durcissement incomplet) peut s'adapter au contour modifié (incorrect) de l'outillage et terminer ensuite le cycle de durcissement.

Bien que l'effet des changements de contour d'outillage soit minime dans les stratifiés plats, son importance augmente considérablement dans les structures composites à courbures multiples. Par exemple, dans le pire des cas, le composant composite peut rétrécir sur l'outillage (outillage positif) et/ou le retrait peut provoquer une déformation ou une déformation de l'outillage (outillage négatif) (Figure 6.2), ou il peut être rendu défectueux en raison de la formation de fissures dans le stratifié (voir également le chapitre 8).

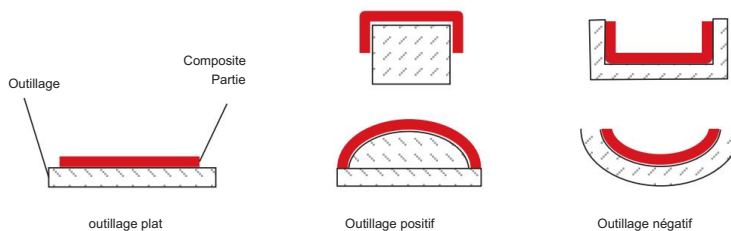


Figure 6.2 Contours d'outillage

Afin d'obtenir des composants non poreux et donc une bonne qualité de stratifié, il est important de s'assurer que l'outillage est scellé sous vide. Étant donné que le durcissement des préimprégnés dans un autoclave se produit sous haute pression (7 à 10 bars ; pour la génération de différence de pression, voir chapitre 5), il est important de s'assurer que la pression de l'autoclave ne pénètre pas dans le sac sous vide. La prévention des vides internes dans un stratifié s'accompagne généralement d'une qualité de surface élevée du côté outillage du composant final. Ce dernier minimise les efforts fastidieux de finition de surface tels que le ponçage et l'apprêt. En conséquence, la qualité de l'outillage affecte également sa rentabilité pour la fabrication de composants composites.

D'autres exigences importantes pour un outillage sont des caractéristiques de manipulation mécanique favorables, telles qu'un bon comportement au démoulage et au nettoyage, la possibilité d'effectuer des réparations de surface et un faible poids net ; certains d'entre eux sont interdépendants. Plus il est simple de démouler un composant et de nettoyer la surface de l'outillage, moins l'outillage est soumis à l'usure et moins il est probable qu'une réparation soit nécessaire. Le faible poids net de l'outillage facilite non seulement un durcissement rapide, mais réduit également les coûts de manutention, tels que le déplacement par grue, par système ferroviaire ou sur un simple chariot roulant. La mise en œuvre d'un système de grue est généralement plus coûteuse que l'utilisation d'un système ferroviaire.

D'autres aspects économiques sont les coûts de fabrication et la durée de vie des outils, qui dépendent du matériau de l'outillage, de sa disponibilité et de sa durabilité. La durabilité du matériau d'outillage sélectionné est particulièrement importante pour les outillages d'autoclave qui doivent résister à des charges cycliques élevées de température et de pression afin d'éviter une usure prématurée élevée.

6.2 Matériaux d'outillage

Une variété de matériaux différents est disponible pour la fabrication d'outils pour les opérations de formage et de durcissement des matériaux préimprégnés ; ces matériaux peuvent également être combinés, selon le domaine d'application.

Le tableau 6.2 donne un aperçu des matériaux d'outillage courants qui seront décrits plus en détail ci-dessous.

Tableau 6.2 Exemples de matériaux d'outillage

Matériel	Description	Type (exemples)
Les métaux	Acier	S235 JR, S355 JR
	Aluminium	ALMG3/3.3535
	Alliage d'acier au nickel (Ni-36)	INVAR 36, Pernifer 1.3912
CFRP (une résine époxy)	Tissu préimprégné	Cycom® 7620,
	Tapis préimprégné quasi-isotrope	HexTOOL®M81 _
CFRP (Résine BMI ou BOX)	Tissu préimprégné	Duratool® 5270
	Tapis préimprégné quasi-isotrope	HexTOOL®M61 _
		Toolmaster BetaPreg
Mousse CFRP	Mousse de carbone	Touchstone CFoam® 20
PRV	Tissu sec + résine, traité par infusion de résine ou drapage manuel	
Autres matériaux	Bois	Contreplaqué OBO, RETIstab
	Planches d'outillage époxy	Necuron, rampe WB700,
	Béton cellulaire	OBO-Modulan, série TB650
		Ytong

6.2.1 Métaux

Les métaux constituent la classe de matériaux la plus simple et la plus couramment utilisée pour la construction d'outils destinés au traitement des préimprégnés. Cela est dû à leur disponibilité facile ainsi qu'à leur capacité de charge élevée. De plus, les outils de durcissement des métaux se distinguent par leur robustesse et donc leur grande durabilité structurelle, de sorte qu'ils peuvent être utilisés sans difficulté pendant plus de 1000 cycles. La surface de ces outils est résistante aux solvants organiques et aux agents de démoulage, et même les dommages, tels que les rayures et les bosses, peuvent généralement être réparés facilement.

Les alliages d'acier, d'aluminium et de ferronickel sont généralement utilisés, l'acier et l'aluminium étant les matériaux de choix en raison de leur prix et de leur durabilité. Les deux matériaux présentent un coefficient de dilatation thermique élevé (Tableau 6.4) qui doit être pris en compte lors de la conception de l'outillage, en particulier pour des températures de durcissement élevées, afin de garantir sa précision dimensionnelle. En fonction de l'outillage et de l'application, une dilatation thermique peut être souhaitée, par ex. par exemple, afin de faciliter le retrait du composant fini de l'outillage pendant le refroidissement (Chapitre 8).

Une précision de contour de 0,3 à 0,4 mm, même avec des outils de grande taille (par exemple 20 × 5 m), peut être obtenue avec des outils métalliques à température ambiante.



Figure 6.3 Outillage en acier pour la fabrication de pales de rotor
[Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

L'inconvénient de l'acier est son poids élevé, qui complique la manipulation et gêne le transfert de chaleur. Les outils de durcissement des métaux sont généralement fabriqués par fraisage de contours, mais également par préformage de tôles. Afin de garantir la géométrie créée, en particulier pour un outillage de grande taille (par exemple une tôle profilée épaisse), même à des températures élevées et/ou lors de manipulations (par exemple par une grue), la géométrie est souvent stabilisée par un support rigide. sous-structure (structure « boîte à œufs »). Cette sous-structure facilite également une manipulation et une installation sûres, par ex. par exemple, de lignes de vide et de points de levage pour soulever l'outillage via une grue.



Figure 6.4 Sous-structure d'un carton à œufs pour la stabilisation des outils [Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

Les alliages de fer-nickel utilisés sont des aciers spéciaux au nickel contenant 36 % de nickel et 64 % de fer (types tels que Invar 36, Permalloy et Ni36). Ce matériau présente un CTE particulièrement faible, presque identique à celui des composants CFRP, même à des températures de durcissement élevées (180 °C). Un inconvénient, semblable à celui de l'acier, est le poids net élevé de ces matériaux à haute densité. De plus, l'usinage d'outillages en fer-nickel nécessite une connaissance particulière de ces matériaux en raison de la toxicité des poussières et vapeurs dégagées (lors du soudage). Les dommages de surface, tels que les rayures et les bosses, se produisent relativement facilement en raison de la ductilité élevée du matériau et leur réparation nécessite des efforts importants. Comme l'aluminium et l'acier, le Ni36 résiste aux agents de démoulage organiques et aux solvants. Cependant, lorsqu'il est exposé à des agents de démoulage à base d'eau, il a tendance à se corroder. Le Ni36 est utilisé en particulier dans l'industrie aéronautique pour les outils de durcissement des grandes structures composites aux contours très prononcés, telles que les ailes (35 × 8 m) ou les segments de fuselage (17 × 4 m).



Figure 6.5 Outillage Invar pour la fabrication de carénages d'aile en CFRP, dimensions 20,5 × 4,8 m [Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

Les outils nickel-galvano représentent une forme spéciale d'outils Ni36 ; ils facilitent le moulage de composants composites avec des surfaces très lisses de classe A.



Figure 6.6 Outillage en nickel-galvano (à gauche) et outillage en nickel coulé (à droite)

[Avec l'aimable autorisation de : Premium Aerotec GmbH]

6.2.2 Matériaux composites à fibres GFRP/CFRP

Par rapport aux métaux, les matériaux renforcés de fibres tels que le GFRP et le CFRP offrent de nombreux avantages pour la construction d'outils. La densité beaucoup plus faible des plastiques renforcés de fibres (FRP), en particulier du CFRP, permet la construction d'outils considérablement plus légers. Le poids net inférieur de l'outillage facilite la manipulation et facilite généralement un chauffage plus uniforme et plus rapide de l'outillage et du composant à polymériser.



Figure 6.7 Outillage CFRP fabriqué à partir de tissu préimprégné [Autorisation : Lufthansa Technik GmbH]

En raison du coefficient de dilatation thermique légèrement négatif des fibres de carbone qui réduit considérablement la dilatation thermique de la matrice, les outils CFRP présentent des CTE beaucoup plus faibles que les outils métalliques comparables. Souvent, leur CTE est presque identique à celui du composant, de sorte qu'il n'y a pratiquement aucune dilatation thermique entre l'outillage et le composant pendant le cycle de durcissement. L'expansion de l'outillage et des composants dépend fortement de leurs structures stratifiées respectives. La figure 6.8 montre les coefficients de dilatation thermique du CFRP et de divers métaux. Les courbes indiquent clairement comment le CTE des matériaux CFRP change en fonction de la structure du stratifié. Les outils en plastique renforcé de fibres sont généralement conçus avec une structure quasi-isotrope (principalement des structures en tissu). Cependant, la structure doit correspondre à la structure du stratifié et à la géométrie du composant préimprégné (voir également le chapitre 8) afin d'éviter les contraintes thermiques entre les deux.

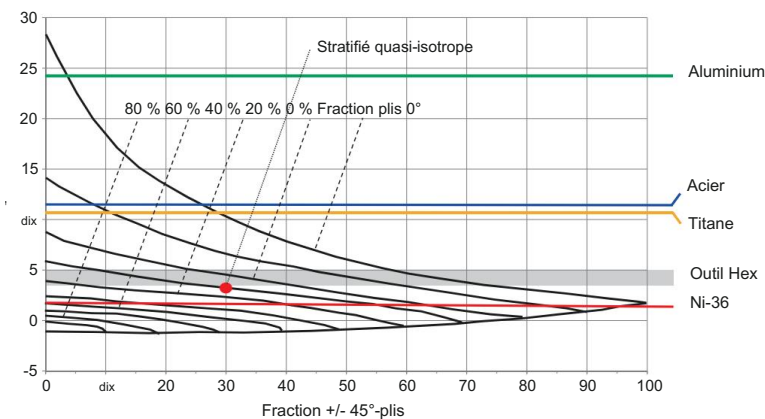


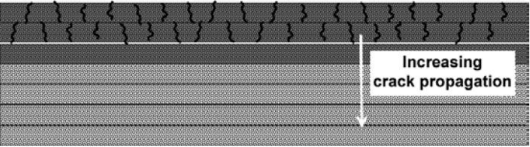
Figure 6.8 Coefficient de dilatation thermique des métaux et des CFRP en fonction de la structure du stratifié

Des différences significatives de CTE, par exemple entre les composants acier/aluminium et CFRP, peuvent être avantageuses pour le démoulage d'outillages positifs (Figure 6.2).

Ici, l'outillage présente un CTR plus élevé que le composant CFRP et, par conséquent, l'outillage se contractera à un degré plus élevé que le composant CFRP pendant le refroidissement, sans rétrécissement. Désormais, le composant final et l'outillage peuvent être facilement séparés.

Par rapport à leurs homologues métalliques, les outils en FRP présentent des durées de vie considérablement plus courtes, en fonction de la température de service et de la période d'application ainsi que de la matrice de résine utilisée. Alors que les outils métalliques atteignent facilement 1 000 cycles et plus, les outils FRP ne peuvent souvent être utilisés que pendant plusieurs centaines de cycles. La matrice FRP se dégradera sous les températures élevées requises pour le durcissement du préimprégné dans un autoclave et l'augmentation de la pression partielle d'oxygène. Les résines époxy présentent en particulier une forte décomposition oxydative de la matrice à des températures élevées (150 à 200 °C). Cela conduit à la formation de microfissures en surfa

aux fuites (processus de fluage) de sorte que l'outillage ne peut plus maintenir un vide suffisant. Les composants fabriqués avec de tels outils présentent souvent des vides dans le stratifié. D'autres signes typiques d'usure comprennent l'abrasion superficielle, causée principalement par des rayures et/ou des opérations de nettoyage telles que le ponçage et le polissage.



Graphique 6.9
Microfissuration superficielle des outillages en résine époxy

Durées de vie augmentées jusqu'à env. 1000 superpositions peuvent être réalisées avec les résines matricielles BMI. Ils sont durcis à des températures d'env. 240 °C, ce qui est considérablement plus élevé que la température de durcissement des systèmes préimprégnés courants à base de résine époxy (120 à 180 °C pour un durcissement complet). En raison de leurs températures de durcissement élevées, les systèmes BMI présentent également des températures de transition vitreuse (Tg) élevées, ce qui conduit à une bonne stabilité dimensionnelle de l'outillage. Ces systèmes sont également résistants à l'oxo-dégradation en raison de leur composition chimique. La figure 6.10 montre le pourcentage de perte de poids d'une matrice BMI par rapport à une matrice époxy au cours d'un processus de vieillissement à long terme. La figure montre que la matrice de l'IMC se dégrade à un rythme considérablement plus lent.

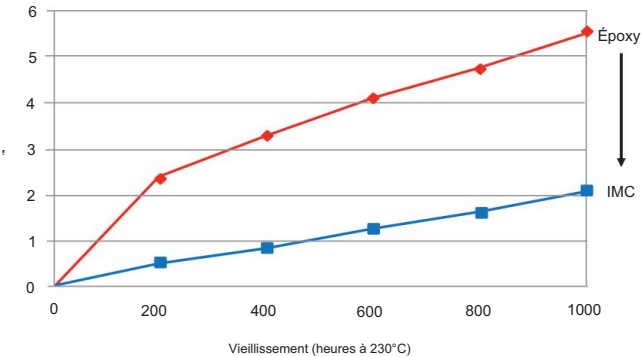


Figure 6.10 Vieillessement de la matrice BMI par rapport à la matrice époxy

Comme les outils métalliques, les surfaces des outils FRP ne sont généralement pas sensibles aux agents de démoulage et les petits dommages sont facilement réparés.

Le tableau 6.3 compare les caractéristiques du Ni36 avec celles des matériaux CFRP avec matrice BMI en ce qui concerne leur utilisation comme matériaux d'outillage.

Tableau 6.3 Comparaison des métaux et du CFRP comme matériaux d'outillage

Exigence	Objectif	Alliage Nickel36	CFRP (matrice IMC)
Coût d'acquisition Aussi bon marché que possible Doublons coûteux			Doublons : même prix que le premier outillage, matériau souvent moins cher que l'alliage Ni-36
Finition de surface	Utilisation directe d'agents de démoulage possible	Difficile à fraiser/dégrossir, technique établie	Difficile à fraiser/dégrossir, technique établie
Durabilité des surfaces	Illimité	Illimité moyennant un entretien approprié	Illimité sous réserve d'un entretien approprié
Durabilité, nombre de cycles	Plus de 1000 cycles	Illimité	Plus de 1000 cycles
Flexibilité pour les modifications de conception	Matériau facile à traiter et à fraiser/couper en contour	Difficile à souder et à fraisage en contour sans recuit supplémentaire	Du matériel supplémentaire peut être laminé en surface, fraisage facile du contour de la surface
Modifications de l'outillage	Géométrie d'outillage facile à adapter	Tolérances de surface très difficiles à maintenir lors d'un fraisage complet	Facile à modifier sans perte de tolérances
Réparabilité	L'outillage peut être réparé avec des techniques simples et établies	Soudage et re-fraisage des contours de la surface	Application de matériau supplémentaire sur la surface et re-fraisage du contour

La figure 6.11 montre un outillage GFRP utilisé pour la fabrication de composants de pales de rotor. Étant donné que des systèmes de résine avec de basses températures de durcissement (jusqu'à environ 80 °C) sont souvent utilisés pour ces composants, la dilatation thermique de l'outillage est généralement faible, ce qui fait des systèmes GFRP/époxy des matériaux adaptés à ces applications.

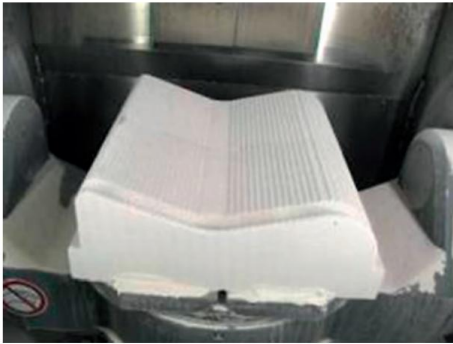


Graphique 6.11
Outillage GFRP [Autorisation : Grunewald GmbH]

6.2.3 Autres matériaux

Les matériaux tels que le bois, le béton cellulaire, les mousses ou les blocs d'outillage époxy ne sont généralement pas utilisés directement comme outils de durcissement pour les préimprégnés car ils n'offrent ni la durabilité requise ni la stabilité en température (tableau 6.4). Cependant, les blocs d'outillage en bois et en époxy conviennent parfaitement comme outils de préforme et/ou de formage à chaud pour des composants de plus petite taille à des températures de service allant jusqu'à env. 120 °C. Une autre application des blocs d'outillage époxy, du béton cellulaire et des mousses est la fabrication de moules maîtres utilisés pour constituer les préimprégnés pour l'outil de production final.

Les surfaces poreuses, comme celles du béton cellulaire, sont scellées avec des agents d'étanchéité à base de silicone avant d'être utilisées comme outil de formage.



Graphique 6.12

Pré-outillage fabriqué à partir d'un bloc d'outillage époxy
fraisé [Autorisation : Grunewald GmbH]

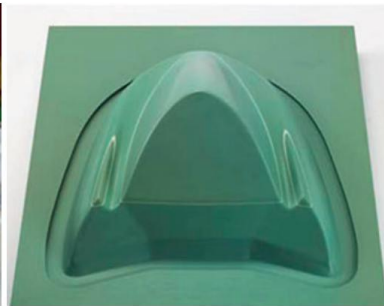


Figure 6.13 Outillage pour formage à chaud en bois (à gauche), matériau d'outillage Necuron (à droite)

[Avec l'aimable autorisation de Necumer GmbH]

Le tableau 6.4 donne un aperçu des caractéristiques sélectionnées de divers matériaux d'outillage.

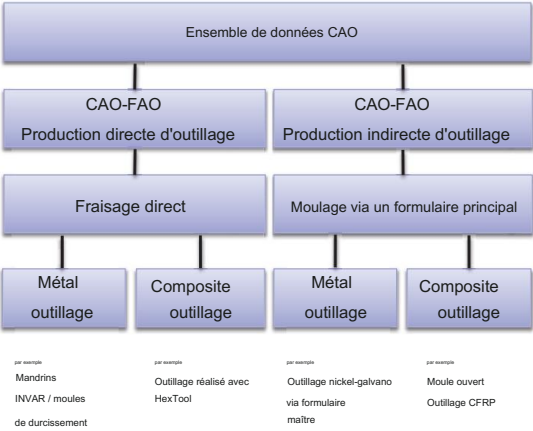
Tableau 6.4 Caractéristiques des divers matériaux d'outillage

Matériel	Tapez (exemple)	Densité en g/cm3	CTE dans 10-6/K	Service température	Dimensionnel accu-raté	Durabilité	Technologie de production
Acier	S235 JR	7.8	12	jusqu'à 200	-	++	Fraisage de contours
Alumi-num	ALMG3/3.3535	2,75	24	jusqu'à 200	- -	++	Fraisage de contours
NiFe36	Pemifer 1.3912	8.1	1,5	jusqu'à 200	++	++	Fraisage du contour de la surface
CFRP-époxy	HexTOOL® M81 1.4-1.6		4-5 jusqu'à 180		+	0	Durcissement du préimprégné en autoclave + fraisage du contour de la surface
CFRP-IMC	HexTOOL®M61 _	1,55	4.2	jusqu'à 200	++	++	Durcissement du préimprégné en autoclave + contour mil-ling de surface
Mousse CFRP	CFmousse 20	0,32	5	jusqu'à 500	+	++	Fraisage de contours
Planche à outils époxy	Rampe WB700	0,7	40	jusqu'à 135	++	-	Fraisage de contours
Bois	Contreplaqué OBO RETItab	0,41-0,48	3 à 5 RT	jusqu'à 150	0	-	Contour fraisage
Cellulaire béton	Ytong	0,35-0,65	8	jusqu'à 250	0	-	Fraisage de contours

- - très mauvais ; - mauvais ; 0 acceptable ; + bien ; ++ très bien

6.3 Fabrication d'outils

Les techniques utilisées pour la fabrication des outils peuvent varier en fonction du matériau utilisé et de la technologie à laquelle les outils sont destinés. La figure 6.14 montre les principes fondamentaux pour la fabrication d'un outillage de durcissement pour préimprégnés à partir d'un ensemble de données CAO. Moules simples, par ex. par exemple, pour le montage manuel dans la construction de bateaux ou le modélisme, sont réalisés sur la base de dessins bidimensionnels plutôt que d'ensembles de données CAO.



Graphique 6.14
Principes de fabrication des outils de formage

6.3.1 Fabrication directe d'outils de formage

La fabrication directe d'outils décrit les méthodes de fabrication qui fraisent directement un outil à partir du matériau d'outillage (métal ou CFRP) au moyen d'un modèle CAO spécialement créé. À cette fin, les données CAO sont converties dans un format lisible par la fraiseuse (CAO-Chaîne de FAO pour les données 3D). L'outillage est d'abord soudé à partir de tôles préformées individuellement, détendues par recuit et sablée. Par la suite, la surface du moule est usinée et affûtée (finition de surface) pour créer le contour final. Fraiseuses, cette méthode de fabrication permet des tolérances très serrées (précision du contour de 0,3 à 0,4 mm) de l'outillage final. Enfin, les fixations et accessoires, tels que le système de vide, les thermocouples et les points de levage, sont montés. Avant la livraison de l'outillage au client, son étanchéité et sa précision de contour sont testées.



Figure 6.15
Outillage en INVAR pour la fabrication de CFRP composites [Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

Afin de fabriquer directement des outils CFRP, des matériaux d'outillage spéciaux, tels que HexTOOL®, sont nécessaires. Contrairement à de nombreux autres outils préimprégnés, ces matériaux ne sont pas constitués de tissus, mais sont livrés sous forme de tapis quasi-isotropes constitués de coupes de fibres courtes avec de la résine préimprégnée. En raison de leur extrême dureté et de leurs caractéristiques internes, il est possible d'obtenir par fraisage et polissage des rugosités de surface ($R_a = 1$ à $1,5$) comparables à celles des métaux. Le fraisage de ces matériaux nécessite une expérience considérable ainsi que des outils de fraisage spéciaux afin d'éviter les défauts de surface causés par la rupture des fibres ou les fissures de la matrice.

Le principal avantage de ces matériaux réside dans le fait que l'outillage peut être modifié pour refléter les changements de contour rétroactifs en superposant des couches supplémentaires de matériau d'outillage et en les faisant pour refléter le contour modifié. Les matériaux permettent également des réparations de surfaces. Ni la réparation ni l'adaptation rétroactive des contours ne sont généralement possibles avec des outils métalliques.



Graphique 6.16

Outillage CFRP fabriqué à partir
de préimprégné HexTOOL®

[Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

6.3.2 Fabrication indirecte d'outils de formage

Pour la fabrication indirecte d'outils, les données du modèle CAO sont d'abord utilisées pour fraiser un maître-moule à partir d'un matériau approprié. Ce maître-moule est ensuite utilisé dans un deuxième temps pour former et fabriquer l'outillage proprement dit. Cette approche est souvent utilisée pour les outils CFRP et galvano. Un inconvénient par rapport aux outils fabriqués directement est le fait que les tolérances (par exemple en ce qui concerne la précision des contours) des différentes étapes de fabrication vont s'accumuler.

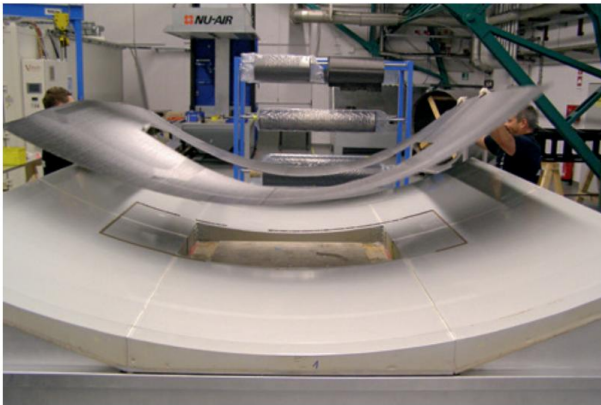
Le modèle de la figure 6.17 est un outillage en matériau Ebalta (bloc d'outillage époxy) avec une structure de support en bois. Le moule Ebalta flotte sur la structure de support, c'est-à-dire, c'est-à-dire qu'il n'est pas connecté en permanence, afin d'éviter les contraintes provoquées par les différences de coefficients de dilatation. La surface de ce moule représente le contour de l'outillage à fabriquer en CFRP. Ici, le CFRP

l'outillage est utilisé pour la fabrication d'un coussin de pression de porte dans la structure d'encadrement de porte d'un fuselage d'avion. L'outillage est nécessaire pour garantir la précision du contour et fournir une interface correcte entre la structure du fuselage et les structures de renfort au niveau de la découpe de la porte.

Ici, la précision du contour de l'outillage est la somme de la précision de fabrication du moule en Ebalta (fraisage et meulage et/ou polissage du contour) et de la précision de la production de l'outillage CFRP. Dans l'exemple présenté, la précision finale du contour était d'env. $\pm 0,7$ mm.

Fabrication d'outils CFK

Il existe différentes approches pour la fabrication d'outils en plastique renforcé de fibres pour le durcissement des composants préimprégnés. Souvent, des moules maîtres fabriqués à partir de différents matériaux, tels que le métal, le bois ou le plastique, sont utilisés. Tout d'abord, une image miroir du contour de la surface finale du composant est fraisée à partir du matériau d'outillage, scellée si nécessaire, polie et un agent de démoulage est appliqué. Le maître est ensuite utilisé pour stratifier l'outillage en plastique renforcé de fibres, en utilisant des tissus en fibres de verre ou de carbone et des résines de fabrication de moules ou des préimprégnés d'outillage spécifiques (Tab



Graphique 6.17
Maître pour la fabrication d'un
outillage CFRP [Autorisation :
Premium Aerotec GmbH]

L'avantage de cette approche réside dans le fait qu'une fois le master produit, il est possible de stratifier à plusieurs reprises de nouveaux outils en plastique renforcé de fibres. Comme pour les moules métalliques, la géométrie créée est stabilisée par une sous-structure rigide, qui facilite une manipulation sûre et le montage de conduites de vide et de points de levage. Afin d'éviter les différences de comportement de dilatation thermique entre le moule et la structure de stabilisation, des structures CFRP sont souvent utilisées pour renforcer le moule. En fonction de l'état de surface (hauteur crête à vallée) du moule principal, il est possible de former des composants très lisses à partir d'outillages CFRP (Figure 6.7).

Fabrication de moules Nickel-Galvano

Alors que les outils CFRP peuvent être fabriqués par « simplement » laminage sur le maître, le chemin vers les outils nickel-galvano est plus complexe. Ici, un maître est d'abord fraisé, par ex. par exemple, un bloc d'outillage époxy dont le contour correspond au contour du composant final. Puis du Ni36 est déposé sur la surface de ce master (via un bain électrolytique) jusqu'à ce que l'outillage atteigne l'épaisseur de paroi souhaitée. Après démoulage, la surface de l'outil est meulée et polie (finition miroir). Afin de stabiliser le moule, une structure en carton d'œufs en acier ou en Ni36 est utilisée, similaire à d'autres outils métalliques. Les outillages nickel-galvano (NGT) sont utilisés pour fabriquer des composants composites avec des surfaces de classe A.

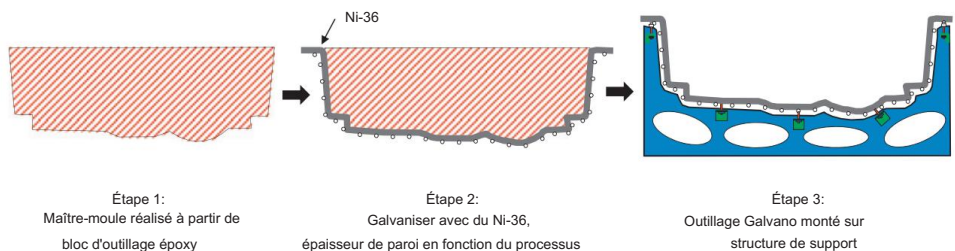


Figure 6.18 Séquence de fabrication des outils nickel-galvano



Figure 6.19
Outillage nickel-galvano pour composants d'avions [Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

La précision du contour des NGT peut être ajustée via des connexions filetées derrière la feuille. Sur la figure 6.19, le mécanisme de réglage est visible dans la partie supérieure gauche. La feuille de couverture est si « fine » que son contour peut être ajusté même après la mise en place de l'outillage. Il permet de répondre aux exigences de précision de contour de $\pm 0,2$ à $\pm 0,3$ mm.

6.4 Concepts et exemples d'outillage

Pour donner aux matériaux préimprégnés la forme souhaitée, il faut souvent non seulement un moule et un outil de durcissement, mais également un concept d'outillage. C'est souvent le cas pour les composants aux géométries exigeantes, par ex. par exemple, surfaces à courbures multiples avec éléments de renforcement. Il s'agit souvent de processus de génération de composants en plusieurs étapes dans lesquels chaque étape ou composant individuel nécessite un outillage spécifique. Dans une étape finale, les sous-composants individuels, par ex. par exemple, les segments de peau et les longerons sont assemblés et durcis. Outre les opérations de formage et de durcissement des composants préimprégnés, des exigences en termes de qualité de surface ainsi que de précision de l'épaisseur et des rayons du stratifié doivent être respectées. Dans ce cas, il est parfois difficile d'évaluer à l'avance si le concept d'outillage sélectionné sera efficace, car l'outillage, le matériau et le processus s'influencent mutuellement (chapitre 8).

Dans ce qui suit, nous décrivons une variété de concepts d'outillage courants et leurs applications. Des exemples détaillés expliqueront la conception de tels outils de traitement des préimprégnés ainsi que leur mise en œuvre dans la chaîne de processus.

6.4.1 Outils de formage à chaud

Lors de la fabrication de composants profilés, tels que des longerons, il est possible de déposer directement le préimprégné sur l'outillage de durcissement et de former chaque couche individuelle. Pour simplifier ce processus et le rendre plus efficace, le préimprégné peut d'abord être transformé en une pile plate (bidimensionnelle) via ATL ou AFP (Section 4.4). Par la suite, cet empilement est transformé d'une préforme bidimensionnelle en contour tridimensionnel souhaité sur un outillage de formage à chaud sous chaleur et pression. Le processus de formage a généralement lieu dans un solarium (Section 4.7), où le matériau est d'abord chauffé puis formé sur l'outillage. L'outillage peut être utilisé davantage, par ex. par exemple, pour former un profil en T (couramment utilisé dans l'industrie aéronautique) à partir de deux préformes en forme de L (Figure 6.22).

Pour les petits outils de formage à chaud, des matériaux tels que le bois ou l'époxy conviennent. Pour les outils de plus grandes dimensions, les métaux ou le CFRP sont mieux adaptés en raison de la stabilité intrinsèque requise (stabilité dimensionnelle). Les matériaux non métalliques offrent l'avantage d'une capacité thermique inférieure qui garantit que l'outil chauffe très peu, même lors d'une utilisation consécutive. Ceci facilite à son tour le détachement de la préforme finie de la surface de l'outillage, car le caractère collant du matériau préimprégné, et donc l'adhésion à une surface, augmente avec l'augmentation de la température. L'utilisation d'un film antiadhésif facilite la séparation du composant et du moule. Le film antiadhésif peut devoir être plutôt flexible (élastique) pour empêcher la formation de rides entre la surface de l'outillage et la pile de préimprégnés.

En fonction du contour du composant, il est possible de créer des contre-dépouilles dans la préforme afin qu'elle puisse être directement transférée dans l'outil de durcissement.

La figure 6.20 montre un outillage de formage à chaud relativement petit pour la fabrication de nervures embouties sous forme négative. Ici, la pile de préimprégnés à former est positionnée sur le bloc de bois et sur le trou fraisé, puis formée via la méthode à diaphragme unique (Section 4.6).



Graphique 6.20

Outillage de formage à chaud pour la fabrication de nervures embouties

La figure 6.21 montre de grands outils de formage à chaud pour la fabrication de longerons. La figure 6.22 montre une séquence de fabrication pour la production de longerons en T par formage à chaud. Ici, une pile plate est formée sur l'outillage et découpée. Ensuite, les noyaux sont tournés et pressés afin de créer un profil en T.

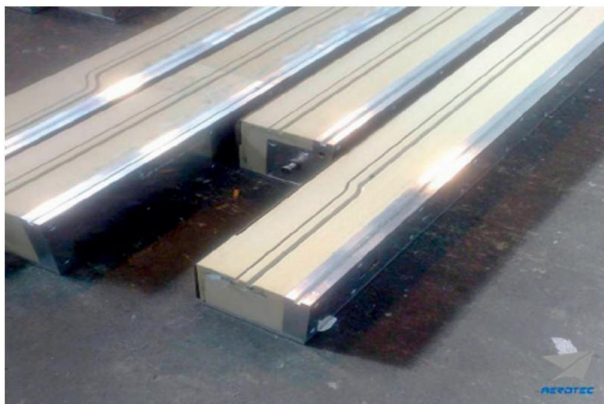


Figure 6.21

Grand outil de formage à chaud pour la fabrication de longerons

[Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

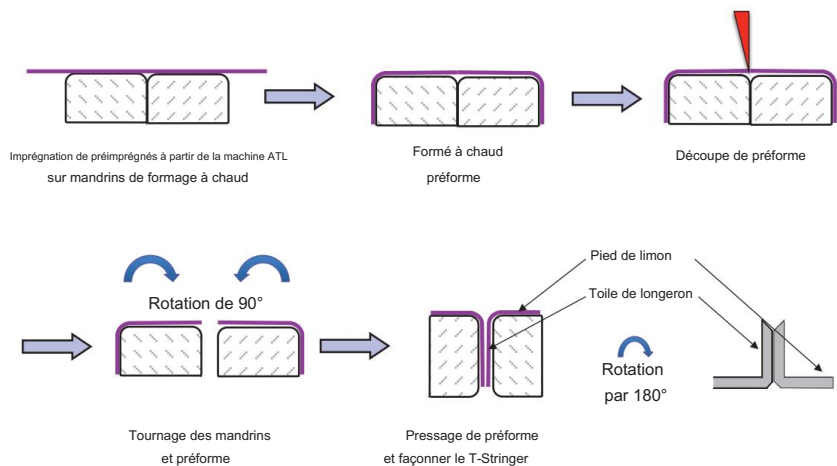


Figure 6.22 Séquence de fabrication des longerons en T

6.4.2 Moules de durcissement

Les moules pour le durcissement des composants préimprégnés peuvent être classés en différentes catégories : moules ouverts et moules fermés (Figure 6.23). Dans les moules ouverts, la surface inférieure est constituée d'un outil de formage dur (par exemple en métal ou en CFRP) et la surface supérieure est recouverte d'un système de vide flexible avec une membrane jetable (sac en film), qui est scellée (étanche au vide).) au moule inférieur sur les côtés à l'aide de ruban adhésif. Au lieu du sac en film, le dessus des moules fermés constitue également un outillage dur.

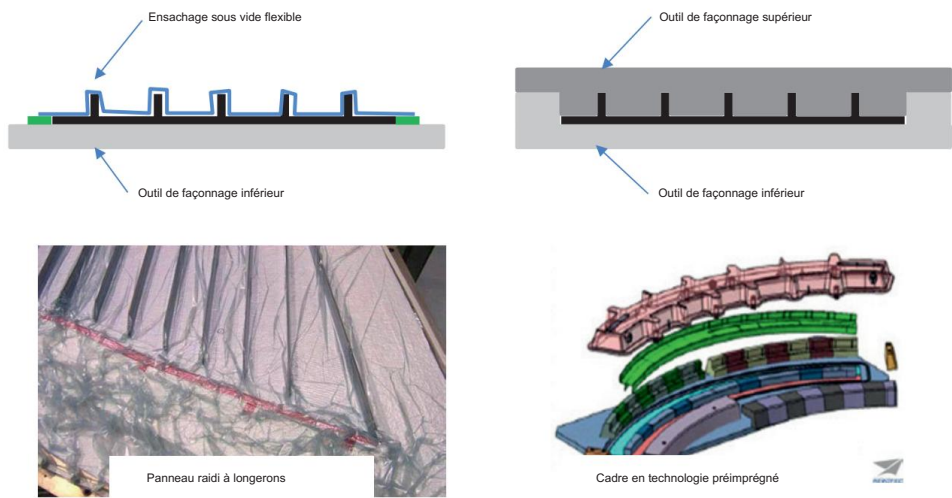
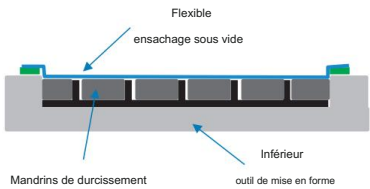


Figure 6.23 Schémas d'un moule ouvert (à gauche) et fermé (à droite)

D'autres éléments de formage sont souvent utilisés, tels que les mandrins de durcissement, où l'on distingue les systèmes de noyau rigides et flexibles. Le schéma de la figure 6.24 montre une configuration potentielle de l'outillage (noyau de durcissement et outillage inférieur), du composant et de la membrane en film. Ils sont utilisés, par exemple, pour positionner des longerons non durcis sur un segment de peau non durci avec des tolérances de forme et de positionnement étroites, puis pour les durcir ensemble.



Graphique 6.24
Mandrins de durcissement dans les procédés selon le principe du moule ouvert

Le tableau 6.5 donne un aperçu des avantages et des inconvénients des moules ouverts et fermés. Le durcissement du composant dépend, entre autres facteurs, de la complexité du composant et de la séquence du processus de production. Par conséquent, il n'est pas possible de faire des déclarations générales quant au type de moule à utiliser pour quel type d'application.

Tableau 6.5 Aperçu des avantages et des inconvénients des systèmes de moules ouverts et fermés

	Avantages	Désavantages
Fermé d'un côté : moule ouvert	Presque aucune contrainte dans la conception de la ligne de moule interne	Structure de surface indéfinie côté ensachage Grande quantité de matériel d'ensachage (pas de réutilisation)
Fermé des deux côtés : moule fermé	Surfaces très bien définies et lisses (surface entière de la pièce composite), bien préparées, par ex. par exemple, pour peinture ou assemblage ultérieur	Un investissement en capital élevé Des outils très lourds Taille d'outillage limitée Adéquation parfaite entre le CTE de la pièce composite et l'outillage nécessaire

Le tableau 6.6 donne un aperçu des matériaux utilisés pour les mandrins de polymérisation ainsi que des avantages et des inconvénients des mandrins de polymérisation. Les applications de moules ouverts utilisent des mandrins rigides fabriqués, par ex. par exemple, en acier ou en aluminium, ainsi que des man-drels flexibles en silicone ou en caoutchouc naturel. Le choix du matériau du man-drel dépend du concept de traitement ainsi que de la conception des composants. Les mandrins tels que ceux illustrés à la figure 6.24 sont couramment utilisés car ils sont faciles à démouler. La durée de vie du matériau du mandrin est particulièrement importante pour les grandes séries de production.

Tableau 6.6 Aperçu des technologies de mandrins rigides et flexibles

	Technique du mandrin rigide	Technique du mandrin flexible
Matériaux	Mandrins en acier, aluminium ou CFRP Tapis Airpad, mousses rigides AquacoreTM, tubes remplis de sable	Film polyamide/polyimide Silicone et caoutchouc naturel Tapis Airpad
Avantages	Surface très lisse/polie Angles exacts et précision des contours Durabilité presque illimitée du mandrin de polymérisation	Bonne qualité du stratifié Bonne précision des contours Aucune force de contrainte causée par la dilatation thermique Prix bas/rapide/facile à fabriquer
Désavantages	Force de contrainte causée par la dilatation thermique, en particulier. avec mandrins métalliques Impossible de répartir uniformément la pression de l'autoclave, les stratifiés sont sujets à la porosité Construction lourde et complexe	Durée de vie très limitée Possibilités limitées de fournir des tolérances serrées Production constante de mandrins flexibles nécessaire

Les matériaux de mandrin appropriés pour le moulage de pièces creuses, telles que les profilés et les tuyaux Omega, sont des matériaux rigides tels que l'AquacoreTM (Figure 6.25) ou des tubes remplis de sable. AquacoreTM est un matériau résistant à la chaleur et soluble dans l'eau pour la fabrication de noyaux dits perdus. Il est disponible sous forme de poudres humides et peut être mis sous la forme souhaitée manuellement ou par pressage. Le matériau du mandrin peut être facilement lavé (« démoulé ») avec de l'eau du robinet après durcissement. En général, le matériau peut être récupéré par séchage.

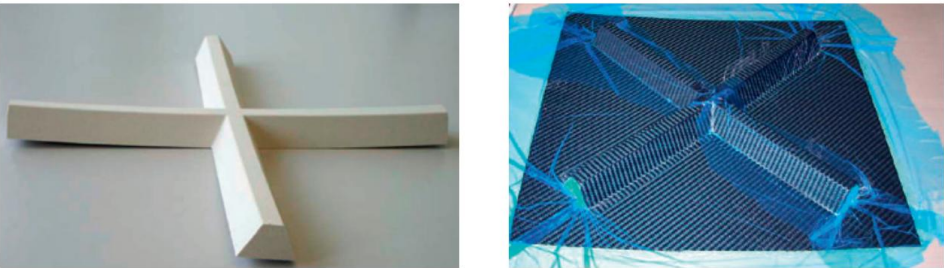


Figure 6.25 AquacoreTM comme matériau de remplissage [Autorisation : Aero Consultants AG]

Les mandrins flexibles peuvent être fabriqués à partir de tubes en film ou en caoutchouc gonflés à l'air comprimé (ou sous la pression d'un autoclave). La figure 6.26 montre différents profilés creux fabriqués via la technologie des tubes et un moule externe.

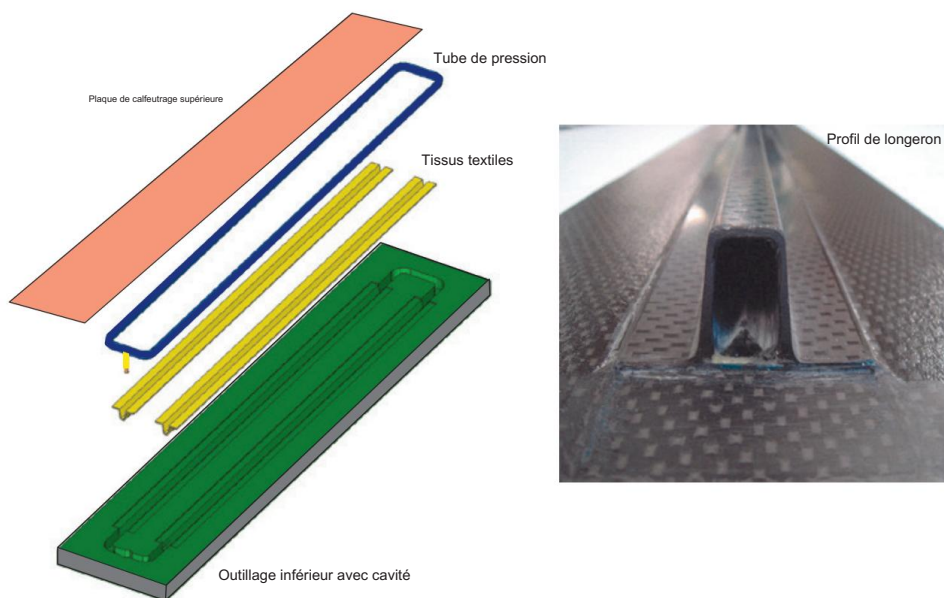


Figure 6.26 Outillage pour la fabrication de profilés creux

Une variante particulière de la technologie du noyau rigide est l'utilisation de mousses rigides comme outil de formage, par ex. par exemple, pour la fabrication de Omega-stringers lors de leur intégration simultanée sur un composant. Il s'agit d'un autre cas d'approche du « noyau perdu », car le noyau en mousse reste dans le composant.

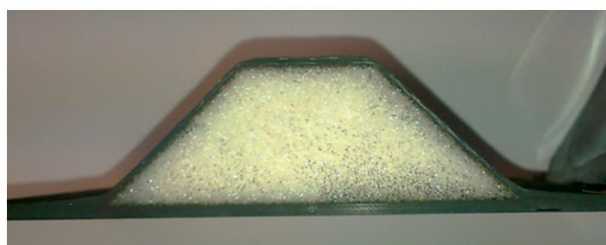


Figure 6.27 Noyau en mousse utilisé comme outil de formage pour le profil Omega

Le tapis Airpad représente une particularité en tant que matériau pour les noyaux, car il peut être utilisé aussi bien pour des applications de noyau rigide que de noyau flexible. L'Airpad est un caoutchouc non durci et sans cône de silicone qui peut être utilisé pour la fabrication de plaques de pression et d'âmes flexibles. Le tapis facilite une pression accrue ou une répartition plus uniforme de la pression sur le composant pendant le durcissement en autoclave. Cela permet d'obtenir une qualité de surface presque identique du côté du sac sous vide du composant et du côté de l'outillage. L'Airpad est résistant à env. les mêmes températures que le silicone ; c

il ne provoque pas de contamination par le silicone. Les tapis Airpad peuvent être renforcés en les collant à des préimprégnés d'outillage, leur offrant ainsi une stabilité dimensionnelle. Cette approche permet l'adaptation locale de la flexibilité et de la rigidité.

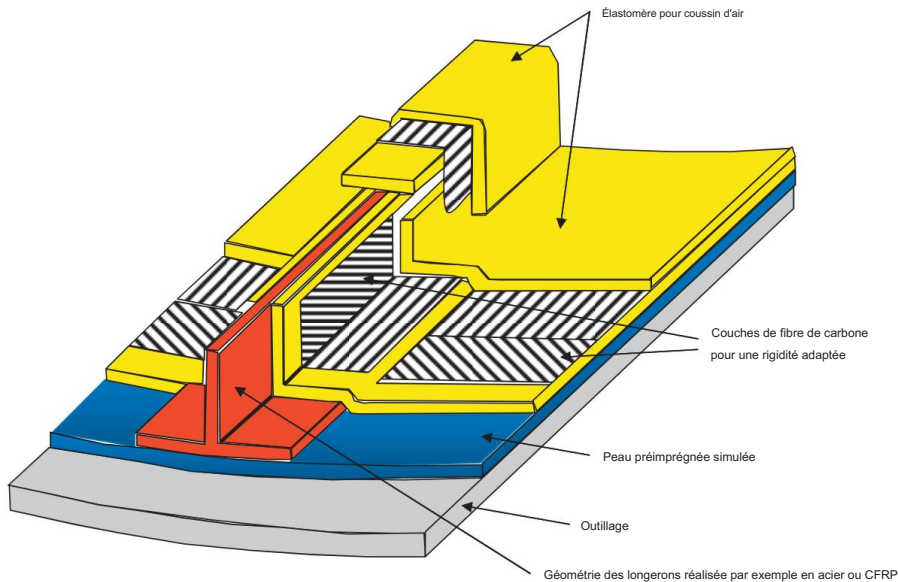


Figure 6.28 Conception pour une fabrication avec un tapis Airpad renforcé

6.4.2.1 Outils de durcissement à moule ouvert

Comme indiqué précédemment, la face supérieure des moules de polymérisation ouverts est toujours équipée d'un équipement de vide flexible et réglable comprenant un sac en film constitué d'une membrane jetable (Figure 6.29). Cette technologie offre une variété d'options pour intégrer des éléments supplémentaires sur la face supérieure du composant, tels que des longerons sur des composants de grande surface. Ici, nous distinguons trois variantes d'intégration couramment utilisées en ce qui concerne les états de durcissement des longerons et du segment de peau :

- a) rigide/doux (stringer durci, segment de peau non durci)
- b) souple/rigide (stringer non durci, segment de peau durci)
- c) doux/doux (les deux parties en contact non durcies)

Comme équivalents des termes « rigide » et « mou », les termes « durci » (= rigide) et « humide » (= mou) sont également utilisés.

Une quatrième variante est le cas dans lequel les deux pièces en contact sont déjà durcies, ce qui correspond à un collage ultérieur. Les variantes a) à c) seront expliquées plus en détail au chapitre 8.

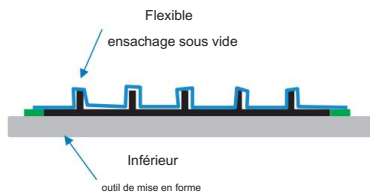


Figure 6.29 Principe de l'outil de durcissement par moule ouvert

6.4.2.2 Outils de durcissement en moule fermé

Contrairement aux variantes à moule ouvert, qui fonctionnent toujours avec une membrane sous vide flexible pour contrer la pression de l'autoclave, les outils de durcissement à moule fermé fonctionnent avec deux moitiés d'outil de formage (Figure 6.30). Les moitiés de l'outil sont conçues pour se sceller mutuellement, ce qui rend superflue une membrane sous vide. En raison des coûts élevés des moitiés d'outils supérieure et inférieure, ce concept de moule est généralement utilisé uniquement pour des composants de plus petites dimensions. Les outils à moule fermé sont beaucoup moins souvent utilisés pour le durcissement des préimprégnés, car l'épaisseur du matériau du préimprégné et la profondeur de la cavité dans l'outil doivent être très étroitement alignées. Si ces deux paramètres ne correspondent pas, soit le moule ne se ferme pas (pile trop épaisse), soit la pile n'est pas suffisamment sous pression (pile trop fine).

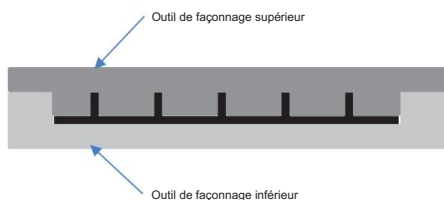


Figure 6.30 Principe du moule de polymérisation fermé

Une combinaison de moule fermé et de moulage par transfert de résine (RTM) pour le durcissement des préimprégnés est à l'étude depuis plusieurs années (chapitre 4). Ici, la pression nécessaire au compactage du préimprégné est créée par une résine RTM fluide.

6.4.3 Agents de démoulage et nettoyage

Pour les opérations de durcissement des préimprégnés, la surface du moule doit toujours être traitée avec un agent de démoulage pour garantir que le composant et la surface de l'outillage de durcissement n'adhèrent pas les uns aux autres. En règle générale, l'agent de démoulage est réappliqué avant chaque cycle de durcissement pour garantir une libération réussie. Au fil du temps et avec l'application répétée d'agent de démoulage, une couche composée d'un nouvel agent de démoulage ainsi que de résidus d'agent de démoulage dégradé et de résine époxy du préimprégné s'accumulera sur la surface du moule. Cela conduit généralement à une perte de qualité de surface sur les composants composites.

ment, car la contamination est partiellement transférée de la surface du moule au stratifié. Ces résidus doivent donc être régulièrement éliminés de la surface du moule.

Le nettoyage est généralement effectué par meulage humide de la surface, suivi d'un polissage et d'une nouvelle application d'agent de démoulage. D'autres options consistent à éliminer la contamination de surface par laser ou par projection de glace carbonique.

6.5 Informations supplémentaires

- [1] G. Niederstadt. Construction écologique et écologique avec des polymères de qualité supérieure. Renningen : Expert-Verlag, 1997.
- [2] M. Kühn, M. Hanke, S. Malzahn, T. Wurl. Elastomere Formwerkzeuge in der Faserverbundtechnologie — Möglichkeiten und Grenzen (Papier). Braunschweig : Congrès allemand de la Luft et Raumfahrt, 2010.
- [3] P. Ermanni. Technologie des composites. Cours ETH. Zurich : ETH 2007, août.
- [4] H. Apmann. Vorteile durch CFK et Leichtbau. Présentation de l'entreprise Premium Aerotec GmbH. 2013.
- [5] Fiche technique, HexTOOL® M61, Hexcel Composites, 2014.
- [6] Fiche technique, HexTOOL® M81, Hexcel Composites, 2014.
- [7] Fiche technique, DURATOOL 5270-2, Cytec Engineered Materials, 2013.
- [8] Brochure technique, Guide de l'utilisateur HexTOOL Fabrics, Hexcel Composites, 2013.
- [9] Fiche technique, Beta Prepreg, AIRTECH Europe Sarl, 2013.
- [10] Brochure produit OBO : Blomberger Holzindustrie B. Hausmann GmbH & Co. KG, édition avril 2012.

7

Test des préimprégnés

Johannes Kramer

Les matériaux plastiques renforcés de fibres (FRP) présentent un comportement anisotrope et donc très complexe ; par conséquent, la simulation de leur comportement à l'appui de la conception et du dimensionnement des composants est également très complexe. Cette classe de matériaux nécessite également des procédures de test spécifiques qui diffèrent des tests conventionnels pour les plastiques standards.

Les propriétés du FRP sont principalement déterminées par le type de fibre, le matériau de la matrice et la teneur en volume de fibres.

L'effet du processus de fabrication sur les propriétés finales doit être pris en compte lors de la détermination des propriétés mécaniques et thermomécaniques des PRF.

Le cycle de durcissement affecte les propriétés de la matrice et de l'interphase, et les micro-défauts créés pendant le processus de fabrication peuvent entraîner ultérieurement une défaillance des composants.

Ceci est particulièrement important pour les préimprégnés, car ici la fabrication d'un composant comprend également la transformation d'un produit semi-fini. Par conséquent, ce chapitre se concentrera sur la caractérisation des produits semi-finis, c'est-à-dire les préimprégnés non durcis. D'une part, ces caractérisations sont pertinentes pour le fabricant en termes de contrôle qualité ; d'autre part, ils constituent également des outils permettant de tester les matériaux à leur arrivée pour l'utilisateur suivant.

D'autres sujets pertinents par rapport aux PRF, tels que les tests non destructifs ou les tests (thermo-)mécaniques, ne seront pas abordés en détail ici ; au lieu de cela, la référence à la littérature existante devra suffire [1–3].

Du point de vue du transformateur, les deux propriétés les plus importantes d'un préimprégné sont la drapabilité et le collant. Il existe cependant un grand nombre de procédures de test et de variantes de test, dont nous décrivons une sélection plus en détail.

Lorsqu'elles sont disponibles, les normes respectives seront référencées.

7.1 Caractérisation du préimprégné non durci

7.1.1 Poids surfacique du préimprégné, teneur en résine et poids surfacique des fibres

Le poids surfacique du préimprégné (PAW) est déterminé gravimétriquement en pesant un échantillon de préimprégné de taille définie. Dans la pratique industrielle, les cercles découpés d'une superficie de 100 cm² sont courants. Afin de déterminer le poids surfacique du préimprégné en g/m², il suffit de multiplier la masse de ce disque par un facteur 100.

Cet échantillon peut simultanément être utilisé pour déterminer la teneur en résine (RC) du préimprégné en % en poids. A cet effet, un solvant approprié est utilisé pour laver la résine de la matrice de l'échantillon de préimprégné pesé. Les fibres restantes sont séparées du solvant, séchées et pesées. La différence de poids représente la teneur en résine. Le poids des fibres, par rapport à la zone d'échantillon, représente le poids réel des fibres (FAW).

Références standards :

ASTM D 3171 : Méthodes d'essai standard pour le contenu constitutif du composite Matériaux (2011)

ASTM D 3529 : Méthode d'essai standard pour la teneur en solides de la matrice et la matrice Contenu du préimprégné composite (2010)

ASTM D3776 : Méthodes d'essai standard pour la masse par unité de surface (poids) du tissu (2013)

DIN EN 2329 : série aérospatiale ; préimprégnés de fibres textiles de verre; méthode d'essai pour la détermination de la masse par unité de surface (1993-04)

DIN EN 2559 : Série Aérospatiale — Préimprégnés de fibres de carbone — Détermination de la teneur en résine et en fibres et de la masse de fibres par unité de surface (1997-05)

7.1.2 Flux de résine

Le débit de résine, en tant que mesure de la fluidité de la résine, est un paramètre important pour le traitement des systèmes préimprégnés. Pour déterminer s'il existe encore un écoulement suffisant de la matrice au cours des dernières étapes du cycle de durcissement, le test fournit également des informations sur le degré de vieillissement du préimprégné. Ainsi, la détermination du débit de résine sert également de mesure de contrôle qualité.

Le débit de résine est déterminé en mesurant la perte de masse des échantillons après durcissement dans des conditions définies. Ici, les normes suivantes sont pertinentes :

ASTM D 3531-99 : Méthode d'essai standard pour l'écoulement de résine de préimprégné de fibre de carbone-époxy (2011)

DIN EN 2332 : série aéronautique ; préimprégnés de fibres textiles de verre; méthode d'essai pour la détermination de l'écoulement de la résine (1993-04)

DIN EN 2560 : Série aéronautique — Préimprégnés de fibres de carbone — Détermination du débit de résine (1998-08)

IPC-TM-650 No. 2.3.17 : Pourcentage de flux de résine du préimprégné (08/1997)

Les normes diffèrent par la géométrie, la configuration et les paramètres ; cependant, en principe, les méthodes sont les mêmes. Nous détaillons ci-après la détermination du débit de résine selon la norme DIN EN 2560 :

Le préimprégné est ramené à température ambiante puis stocké dans une atmosphère conditionnée pendant au moins 2 h. La mesure doit avoir lieu dans les 6 heures suivantes. Au moins trois échantillons de préimprégnés carrés (longueur de bord 100 mm) sont découpés selon un motif de découpe, empilés en croix et pesés. L'échantillon est ensuite placé symétriquement entre une couche de film de fluorure de polyvinyle perforé (film PVF), trois couches de tissu à filaments de verre et trois couches de tissu à filaments de verre avec revêtement en polytétrafluoroéthylène. Cette stratification est comprimée entre deux feuilles dans un appareil à température contrôlée (Figure 7.1) puis durcie. Pour cette procédure, la température, la pression et le temps de durcissement doivent être sélectionnés conformément à la fiche technique de performance du préimprégné.

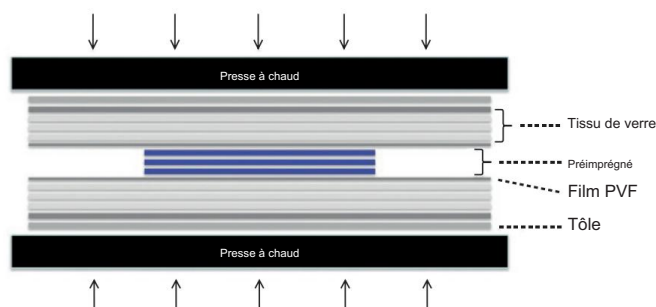


Figure 7.1 Configuration schématique pour la mesure du débit de résine

Une fois refroidi, le montage du film est retiré. Un cuboïde et un cylindre sont découpés dans l'échantillon et pesés.

Le débit de résine (RF) non ajusté est calculé à partir d'au moins deux échantillons selon l'équation. 7,1 et indiqué en pourcentage.

$$RF = -1 \frac{\frac{W_{\text{résine}}}{21}}{WA_2} \times 100 \quad (7.1)$$

Où:

Pourcentage de débit de résine non ajusté RF par rapport à la masse initiale du préimprégné

Poids de l'échantillon W1 avant durcissement

Surface carrée initiale A1 de l'échantillon avant durcissement

W2 poids de l'échantillon coupé après durcissement

Zones A2 rectangulaires et circulaires des échantillons découpées après durcissement

Le flux de résine ajusté pour la teneur en matières volatiles (voir section 7.1.5) est calculé selon l'équation. 7.2 :

$$RF_{\text{ajusté}} = -1 \frac{100 \frac{W_{\text{résine}}}{21}}{W_1 (100 - VC) A_2} \times 100 \quad (7.2)$$

Où:

Pourcentage de débit de résine ajusté par rapport à la masse initiale du préimprégné

Pourcentage VC de matières volatiles (voir section 7.1.5)

7.1.3 Virement de bord

Tack décrit la capacité des matériaux préimprégnés à adhérer à eux-mêmes ou à la surface d'un moule ou d'un outil. Cette caractéristique influence le traitement : le collant doit fournir suffisamment de stabilité pour éviter la désorientation des fibres pendant le traitement, tout en offrant également une possibilité de corrections.

Le collant des préimprégnés est déterminé par plusieurs facteurs. Les paramètres de transformation, tels que la température, ainsi que le matériau de départ et ses conditions de fabrication et de stockage, jouent un rôle déterminant. Ici, une caractéristique importante est la durée de vie. Il définit la durée pendant laquelle un préimprégné peut être stocké à température ambiante tout en conservant une adhérence suffisante pour faciliter le traitement (Chapitre 3).

Il n'existe pas d'échelle standardisée pour le degré d'adhésivité établie dans la pratique industrielle en raison de la grande variété de matériaux et d'autres influences potentielles. Il n'existe pas non plus de méthodes de test standardisées et universelles, mais uniquement des méthodes adaptées à des applications spécifiques.

Le test de tack par sonde est une de ces méthodes pour déterminer le tack d'un préimprégné. Ici, une sonde métallique à température contrôlée est d'abord mise en contact avec le préimprégné puis retirée pendant que la force et/ou l'énergie de séparation est mesurée [4, 5].

Les paramètres importants influençant les résultats de ces mesures sont la température de la sonde, la force de contact, le temps de contact et le taux de décollement.

7.1.4 Drapabilité

La drapabilité décrit la capacité des textiles et des produits semi-finis à se déformer et à s'adapter à un contour tridimensionnel. La qualité du drapage d'un produit semi-fini dépend avant tout de la composition textile. Par exemple, une armure toile a une meilleure drapabilité qu'une armure sergée. Les fortes forces de restauration présentées par les préimprégnés ayant une drapabilité inférieure entraveront la superposition des composants.

Cependant, si la drapabilité est trop élevée, le risque de perdre l'orientation des coupes augmente car celles-ci se déforment trop facilement.

Afin de déterminer la drapabilité d'un préimprégné, le matériau est simplement plié sur un mandrin cylindrique (par exemple d'un diamètre de 3 mm) et ensuite évalué à la loupe pour détecter une fracture des fibres.

7.1.5 Volatils

Pour les préimprégnés fabriqués par voie de solution, la teneur en matières volatiles (VC) du préimprégné non durci est indiquée. Il est mesuré comme le pourcentage de perte de poids après une exposition définie (température/durée) à une température élevée, telle que définie par la norme de matériau concernée.

Le préimprégné est ramené à température ambiante puis stocké sous atmosphère conditionnée pendant au moins 2 h. Plusieurs échantillons de préimprégnés carrés (par exemple 100 mm × 100 mm) sont découpés et leur poids initial est déterminé dans un plateau en aluminium. Après env. Exposition de 20 min à 160 °C dans une étuve à circulation d'air, l'échantillon est refroidi à température ambiante dans un dessiccateur et pesé à nouveau. Selon la procédure de test, cette étape peut être réalisée à l'aide d'une plaque ou d'un dispositif d'accrochage dans le four. Le différentiel de poids, normalisé par rapport au poids initial du préimprégné, est utilisé pour déterminer la teneur en matières volatiles selon l'équation. 7.3.

$$\text{Contenu VC} = \frac{W_3}{W_1 - W_2} \times 100 \quad (7.3)$$

Où:

Pourcentage VC de contenu volatil dans la masse initiale

Poids de l'échantillon initial W1 (y compris plateau en aluminium)

W2 poids du plateau en aluminium

Poids de l'échantillon W3 après chauffage (y compris plateau en aluminium)

Les valeurs typiques du VC des préimprégnés traités au solvant se situent entre 2 % et 8 %.

Pour les préimprégnés thermofusibles, le VC est pratiquement nul et n'est donc généralement pas indiqué.

Références standards :

ASTM D 3530 : Méthode d'essai standard pour la teneur en matières volatiles des matériaux composites préimprégnés (1997)

DIN EN 2330 : série aérospatiale ; préimprégnés de fibres textiles de verre; méthode d'essai pour la détermination de la teneur en matières volatiles (1993-04)

DIN EN 2558 : Série aérospatiale — Préimprégnés de fibres de carbone — Détermination de la teneur en matières volatiles (1997-03)

IPC-TM-650 n° 2.3.19 : Teneur volatile du préimprégné (12/1994)

7.1.6 Viscosité

En général, le durcissement des résines réactives peut être décrit à l'aide de diagrammes TTT (temps-transition-température) [6]. Les réactions chimiques lors de la réticulation de la matrice transforment les résines visqueuses en solides. En d'autres termes, la viscosité augmente à mesure que le processus de durcissement avance. La connaissance de l'évolution de la viscosité d'un matériau préimprégné est précieuse pour déterminer la fenêtre de traitement appropriée lors de son durcissement en composants finaux. C'est également un paramètre important pour la fabrication de préimprégnés car la viscosité peut être utilisée pour contrôler le niveau d'imprégnation et donc l'ensemble du processus (voir Chapitre 3).

La mesure de la viscosité dynamique renseigne sur le comportement de la matrice lors du chauffage dans l'autoclave. Plus le système chauffe rapidement, plus la valeur absolue de la viscosité diminue (en raison de l'augmentation de la température) ; d'autre part, l'augmentation de la température déclenche également une augmentation plus rapide de la viscosité en raison de la réaction de réticulation (Figure 7.2). Ce comportement indique à quel moment la pression de l'autoclave doit être augmentée (voir chapitre 5). Si les mesures de viscosité sont poursuivies sur l'échantillon réticulé, des informations supplémentaires peuvent être obtenues concernant le point de gel, le moment où l'état complet est atteint et le moment où le refroidissement peut commencer.

Les mesures de viscosité isotherme (Figure 7.3) fournissent les paramètres de traitement du matériau préimprégné sélectionné : d'une part la température nécessaire pour régler la viscosité absolue (début de la mesure). D'autre part, cela permet d'estimer la fenêtre de traitement respective, c'est-à-dire. c'est-à-dire pendant combien de temps la viscosité restera dans une certaine plage (voir chapitre 3).

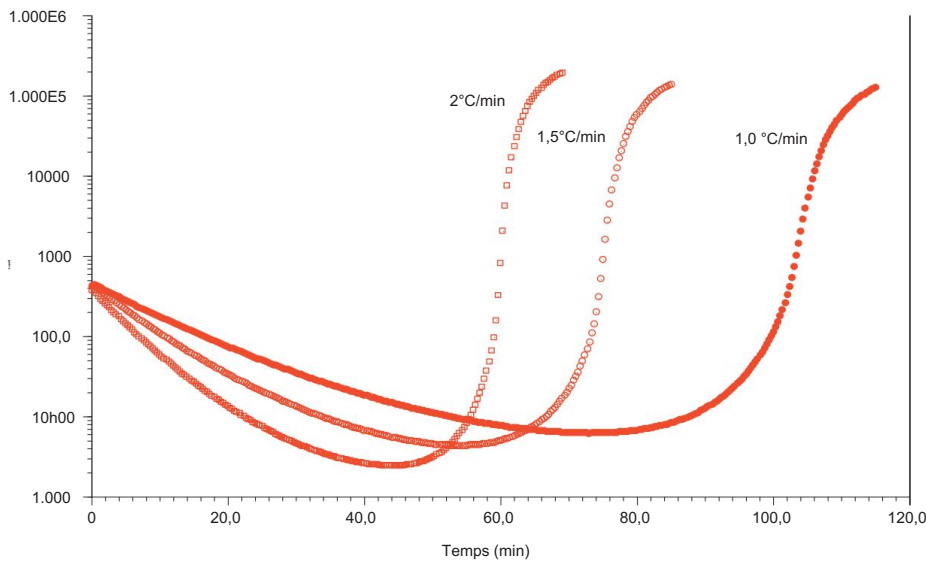


Figure 7.2 Viscosité dynamique d'un système de résine époxy

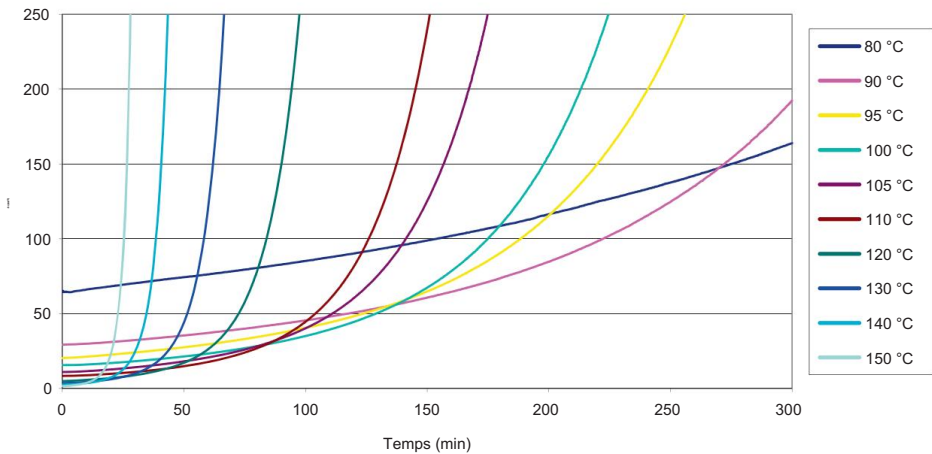


Figure 7.3 Mesures de viscosité isotherme d'un système de résine époxy

Références standards :

ASTM D 4473 : Méthode d'essai standard pour les plastiques : Propriétés mécaniques dynamiques : Comportement au durcissement (2008)

DIN 16945 : Résines réactionnelles, réactifs et matériaux de moulage par réaction ; méthodes d'essai (1989-03)

7.1.7 Test de récupération d'eau (test WPU)

Le test WPU sert essentiellement d'outil d'inspection pour déterminer le niveau d'imprégnation en ligne lors de la fabrication de matériaux préimprégnés. Les résultats sont nécessaires pour adapter les paramètres du procédé aux spécifications du matériau. Pour déterminer le WPU, un échantillon de taille définie est coupé et pesé. L'échantillon est ensuite immergé verticalement dans de l'eau distillée à une profondeur et une durée définies. Pendant que l'échantillon est immergé, les forces capillaires absorbent l'eau entre les fibres. Selon la proportion de fibres non imprégnées, l'échantillon absorbera plus ou moins d'eau. Après la durée de test définie, l'eau adhérent à l'extérieur de l'échantillon est séchée et l'échantillon est à nouveau pesé. A partir de la différence de poids de l'échantillon, le pourcentage de WPU peut être calculé. Ce test ne peut être effectué qu'avec du matériau frais pendant l'opération de fabrication du préimprégné car le stockage (congélation) et la manipulation ultérieurs affecteront les résultats de mesure. En fonction du matériau préimprégné et du niveau d'imprégnation requis, les résultats présentent généralement des tendances. Cependant, ils indiquent au fabricant si la ligne de préimprégnés fonctionne conformément aux spécifications. Les mesures en général ne fournissent pas de critères de qualité dans le cadre d'une spécification.

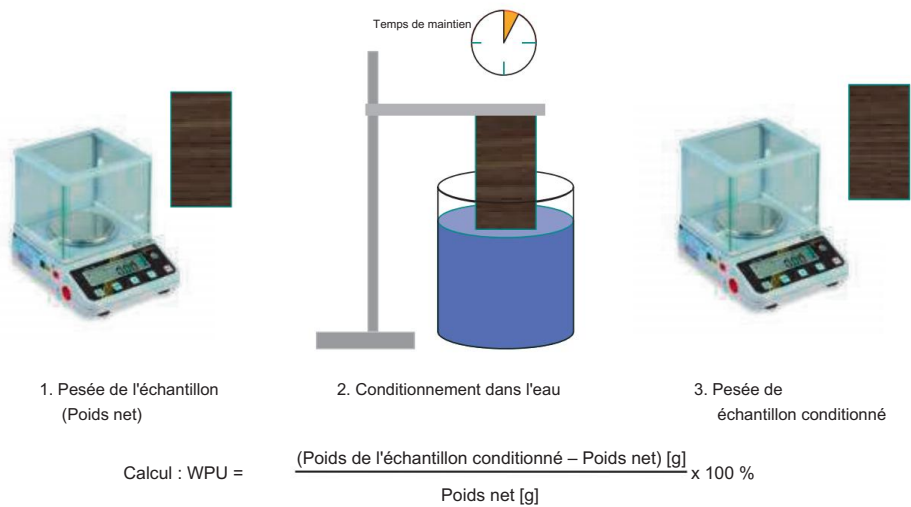


Figure 7.4 Séquence de tests WPU

7.1.8 Test de bord de coupe en microscopie

En plus du test WPU, il existe une méthode optique pour déterminer le niveau d'imprégnation. Ici, le bord coupé d'un échantillon de préimprégné est étudié et une longueur spécifiée est photographiée (images en noir et blanc) [10]. En fonction de la

matériau, des différences distinctes dans le niveau d'imprégnation peuvent être distinguées à l'œil nu. Un logiciel d'évaluation d'images calcule la surface des zones non imprégnées sur la base de leurs valeurs de niveaux de gris et les affiche à l'aide d'une représentation dite en fausses couleurs. Le rapport des différentes zones colorées détermine le niveau d'imprégnation. Semblable au test WPU, cette méthode ne peut pas être utilisée pour faire des déclarations universelles, mais elle indique plutôt une tendance du niveau d'imprégnation basée sur plusieurs mesures et matériaux. La préparation, la mesure et l'interprétation des échantillons nécessitent de l'expérience et de la prudence, car de nombreux facteurs déterminants n'ont pas encore été suffisamment étudiés.

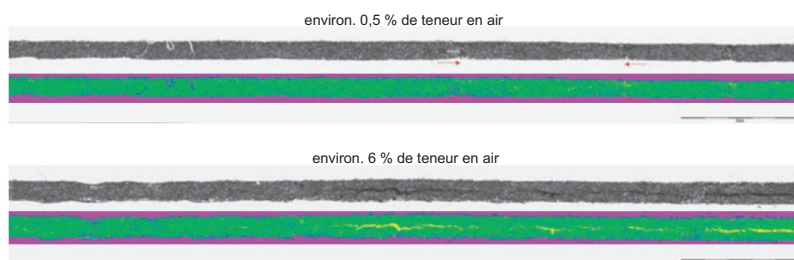


Figure 7.5 Détermination du niveau d'imprégnation par mesures optiques

7.2 Caractérisation du préimprégné durci

7.2.1 Teneur en volume de fibres

Alors que les fournisseurs de produits semi-finis fournissent généralement des informations concernant le rapport matrice/fibre sous forme de rapport pondéral (section 7.1.1), la conception des composants et la gestion de la qualité l'exigent en termes de teneur en volume de fibres (CVF). Les deux valeurs diffèrent en raison des différences de densité des matériaux de la matrice et des fibres. La teneur en fibres peut être déterminée théoriquement soit par calcul par rapport à l'épaisseur du stratifié, soit par la teneur en cendres, soit par dissolution chimique humide, soit optiquement par micrographie. La détermination du FVC via des mesures d'épaisseur de stratifié ou via des méthodes optiques est relativement imprécise et ne fournit pas d'informations sur la porosité ; les autres méthodes prennent

Pour tester la teneur en cendres, un échantillon est pesé avec son support en céramique, puis la matrice polymère est pyrolysée dans un four à micro-ondes. Cette méthode ne peut être utilisée que pour les plastiques renforcés de fibres de verre, car les températures élevées requises provoqueraient une oxydation des fibres de carbone.

La figure 7.6 montre la séquence de tests de détermination du volume de fibres par voie chimique humide. Après pesée, les fibres sont extraites de la matrice par un procédé chimique humide utilisant de l'acide nitrique. Les fibres sont ensuite lavées, séchées et pesées.

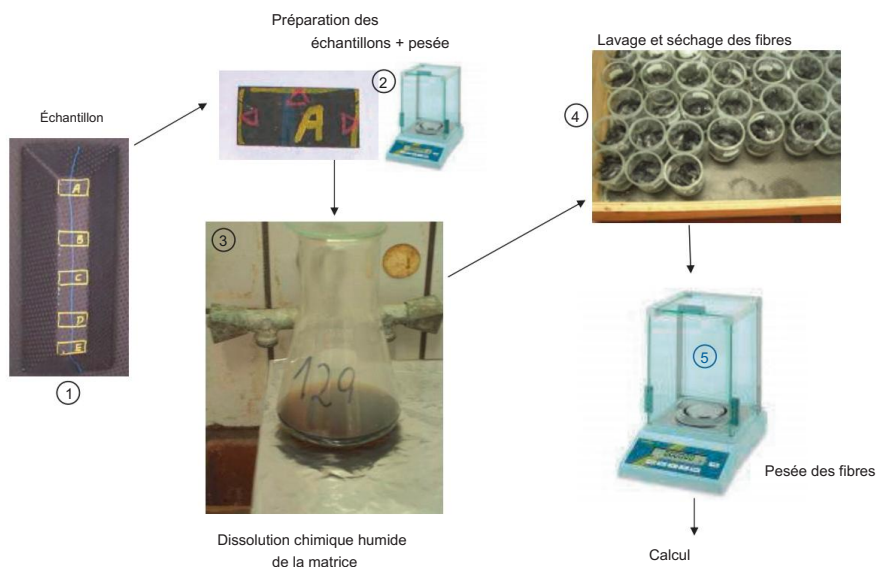


Figure 7.6 Séquence de détermination de la teneur en volume de fibres chimiques humides

Dans les deux cas, la teneur en volume de fibres V_f est calculée à partir des densités et des poids des fibres et de la matrice selon l'équation. 7,4 et indiqué en pourcentage.

$$V_f = \frac{r_{mf} W}{r_{fmm} W + W} \times 100 \quad (7.4)$$

Où :

densité de la matrice r_m

densité de fibre r_f

Poids de la matrice W_m

Poids des fibres W_f

Alternativement, la teneur en volume de fibres peut être calculée à l'aide de la microscopie en utilisant la méthode des aires ou des lignes [11].

Références standards :

DIN EN 2564 : Série aérospatiale — Stratifiés en fibres de carbone — Détermination de la teneur en fibres, résines et vides (1998-08)

ASTM D3171 : Méthodes d'essai standard pour le contenu constitutif du composite Matériaux (2011)

7.2.2 Détermination de la température de transition vitreuse

L'analyse mécano-thermique dynamique (DMTA) est une méthode classique pour déterminer la température de transition vitreuse T_g . Ici, un petit échantillon est exposé à des charges de torsion ou de flexion oscillantes (principalement sinusoïdales à 1 Hz) tandis que la température de l'échantillon est continuellement augmentée à une vitesse de chauffage définie. La figure 7.7 montre le résultat de cette mesure : les caractéristiques du module de stockage, le module de perte, ainsi que le facteur de perte ($\tan \delta$). Il est important de toujours référencer la manière dont la T_g a été évaluée, car les résultats différeront selon la méthode choisie. Généralement, soit le maximum du facteur de perte, le maximum du module de perte, soit la méthode tangente (diminution du module de stockage) peut être utilisée pour l'évaluation (Figure 7.7).

Ces mesures fournissent également des informations sur le degré de durcissement. Si l'échantillon n'est pas complètement durci, le $\tan \delta$ présente un pic plus large et le module de conservation augmente à nouveau après la diminution initiale au point de transition vitreuse.

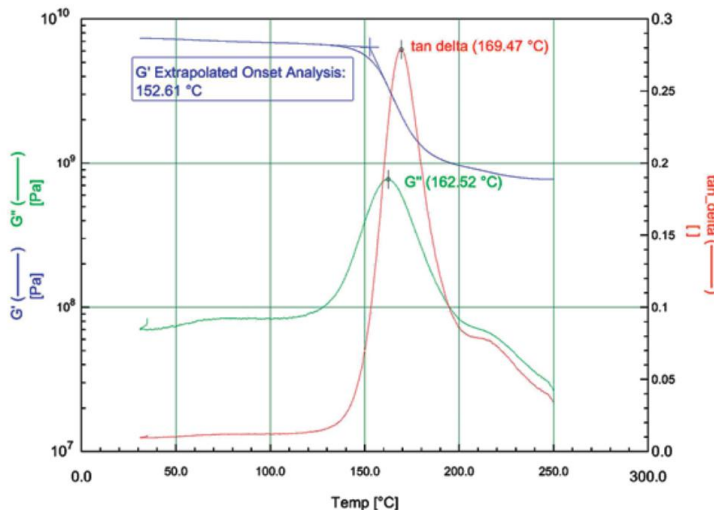


Figure 7.7 Diagramme DMTA pour la détermination de la température de transition vitreuse
[Autorisation : T. Neumeyer]

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est utilisée pour déterminer la T_g d'un préimprégné non durci. Cette méthode utilise un très petit échantillon (environ 0,01 g) et un échantillon de référence ; les deux échantillons sont chauffés à une vitesse typique de 10 à 20 K/min, et le flux de chaleur est mesuré. La transition vitreuse peut être reconnue comme une étape dans la courbe du flux thermique (Figure 7.8).

La température de transition vitreuse de la résine non durcie, T_g , non durcie, est souvent utilisée comme mesure pour la gestion de la qualité. Il permet de déterminer si les caractéristiques du préimprégné ont changé après un stockage prolongé, c'est-à-dire si les caractéristiques du préimprégné ont changé après un stockage prolongé. c'est-à-dire jusqu'où la réaction chimique a déjà progressé.

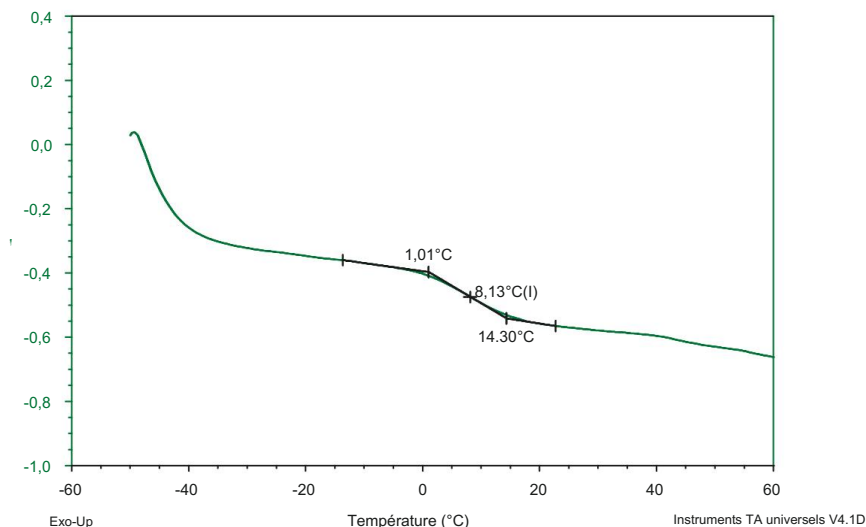


Figure 7.8 Diagramme DSC pour la détermination de la T_g , non durci

Références standards :

DIN EN ISO 11357 : Plastiques — Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) — Partie 2 :

Détermination de la température de transition vitreuse et de la hauteur des marches de transition vitreuse (2013-02)

DIN 65583 : Aérospatiale — Matériaux renforcés de fibres — Détermination de la transition vitreuse des composites de fibres sous charge dynamique (1999-04)

7.2.3 Épaisseur du pli durci (CPT)

L'épaisseur du pli durci est l'épaisseur théorique d'un pli préimprégné durci. Cette valeur peut être calculée à partir du poids surfacique des fibres, de la teneur en volume des fibres et de la densité des fibres selon l'équation. 7.5.

$$CPT = \frac{FAW}{V_f \times \rho_f \times 10} \quad (7.5)$$

Où:

Épaisseur CPT du pli préimprégné durci en mm

Poids réel des fibres préimprégnées FAW

Contenu volumique des fibres V_f

densité de fibre RF

Expérimentalement, le CPT peut être déterminé comme le quotient de l'épaisseur du composant et du nombre de plis individuels.

7.3 Références

- [1] W. Grellmann, S. Seidler. Tests de polymères. 2e éd., Munich : Hanser Publishers, 2013, chapitre 10.
- [2] G.W. Ehrenstein. Faserverbundkunststoffe. 2e éd., Munich : Hanser Publishers, 2006, chapitre 6.
- [3] GW Ehrenstein, G. Riedel, P. Trawiel. Analyse thermique des plastiques : théorie et pratique. 2e éd., Munich : Éditions Hanser, 2004.
- [4] KJ Ahn, JC Seferis, T. Pelton, M. Wilhelm. Analyse et caractérisation du préimprégné Tack. Polymère Matériaux composites. 1992, 13, p. 197-206.
- [5] T. Neumeyer, M. May, J. Krämer, V. Altstädt. Influence de la structure du réseau de la DGEBA Résines époxy sur leur Tack (Affiche). Berlin : Thermodurcissables, 2011.
- [6] M. Wacker, P. Trawiel, G. W. Ehrenstein. Härtung von Reaktionsharzen Diagramme temps-température-transition (réimpression). Erlangen : Département de technologie des matières plastiques, 2007.
- [7] Brochure de la société Hexcel : Prepreg Technologies. Hexcel Composites, 2012.
- [8] Caractérisation des matériaux préimprégnés. MIL-Manuel-17-1E. 2002, chapitre 5, pp. 1-14.
- [9] R.J. Crossley, P.J. Schubel, N.A. Warrior. Détermination expérimentale et contrôle du collant des préimprégnés pour la fabrication automatisée. Plastique, caoutchouc et composites. 2011, 40, p. 363-368.
- [10] Brevet DE102006033663B4 : Verfahren zur Ermittlung eines charakteristischen Parameter an einer Sonde CFK. 2012.
- [11] W. Grellmann, S. Seidler. Tests de polymères. 2e éd., Munich : Hanser Publishers, 2013, p. 548 f.

8

Conception et réalisation

Hauke Lengsfeld

Ce chapitre décrira les différents concepts de conception pouvant être utilisés pour convertir des matériaux préimprégnés en un composant ou un assemblage. Le choix du concept de conception a des conséquences considérables sur le déroulement ultérieur du processus et sur l'assemblage ultérieur du composant, car la conception, les caractéristiques spécifiques au matériau, la conception du composant, le processus, etc. sont interdépendants.

8.1 Concepts de conception

Lors de la conversion de matériaux préimprégnés en composant à l'aide d'un outillage, différents concepts de conception peuvent être appliqués. Ils dépendent de la géométrie du composant et de l'outillage ainsi que du procédé de stratification du préimprégné sélectionné. La conception dépend également du fait qu'un côté ou une surface particulière du composant final doit répondre à certaines exigences des étapes de post-traitement potentielles, telles que l'assemblage (douceur).

Indépendamment de la conception, nous discuterons uniquement des moules de durcissement ouverts (voir également le chapitre 6), c'est-à-dire. par exemple, la surface supérieure du composant sera recouverte d'un équipement sous vide flexible et adaptable composé d'un sac en film et d'une membrane jetable.

8.1.1 Conception positive/négative

En général, nous distinguons deux concepts de conception en ce qui concerne le contour de l'outillage :

Conception positive

Conception négative

Dans un moule positif, le préimprégné est posé sur l'outillage pour former une forme concave (Figure 8.1, à gauche). La surface intérieure du composant sera lisse et capable de répondre à des exigences de tolérance strictes, tandis que la surface extérieure aura une structure indéfinie. Cette conception de moule convient particulièrement aux pièces longues et étroites,

tels que les longerons et les longerons en double T (Figure 8.1, à droite). Cette variante est également souvent utilisée pour les moules de formage à chaud.

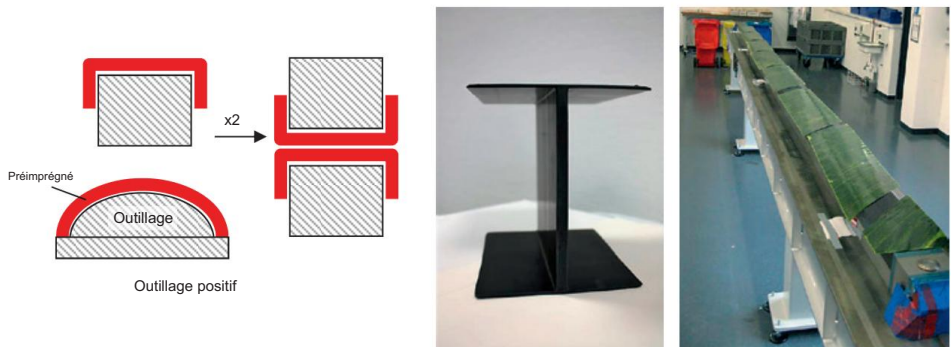
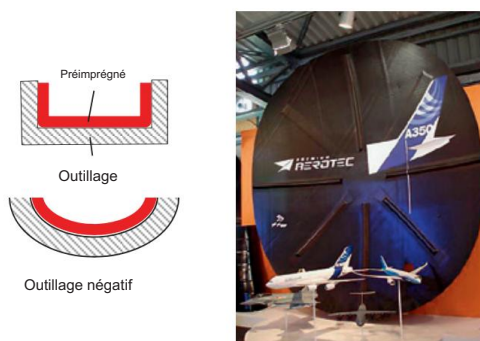


Figure 8.1 Stratification du préimprégné sur moule positif et exemple de composant

Un avantage de cette géométrie est qu'il est généralement plus facile de déposer le matériau sur un moule positif que dans une cavité de moule. Cependant, cela dépend également des caractéristiques de traitement du matériau et de la structure du stratifié (par exemple, rigidité des fibres, pégiosité et orientation des couches). Cette conception convient particulièrement lorsque le coefficient de dilatation thermique/retrait au refroidissement du moule est nettement supérieur à celui de la pièce renforcée par des fibres après durcissement. Ici, le moule « se rétractera » du composant, facilitant ainsi le démoulage.

Dans un moule négatif, le matériau préimprégné est déposé dans un moule où il prend une forme convexe (Figure 8.2, à gauche). Ici, le matériau est drapé dans une cavité de moule.

Cette conception convient lorsque la surface extérieure du composant doit répondre à des exigences de tolérance, par ex. par exemple, à des fins d'assemblage ultérieur. Cependant, les composants doivent avoir une largeur suffisante pour permettre un drapage facile et sans défaut dans la cavité du moule. La conception convient aux composants longs et larges, tels que les calottes de pression et les longerons en C (Figure 8.2, à droite et Figure 8.3). Un autre avantage de cette conception est le fait que des géométries supplémentaires, telles que des longerons, peuvent être intégrées sur la surface supérieure du composant.



Graphique 8.2

Stratification du préimprégné en moule négatif et exemple de composant

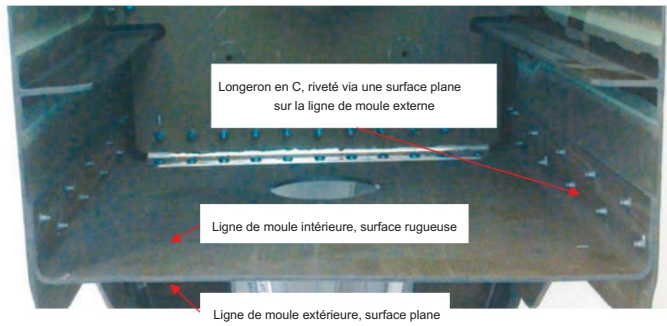


Figure 8.3 Longeron en C (conception négative) une fois assemblé

En ce qui concerne les options d'intégration potentielles, les moules négatifs peuvent être particulièrement distingués.

8.1.2 Conception intégrale/différentielle

Une conception fréquemment utilisée dans l'industrie aéronautique (mais aussi dans d'autres applications composites) repose sur des segments (peaux ou panneaux) renforcés par des longerons. Ces panneaux de peau peuvent être plats, mais ils peuvent également présenter des courbures tridimensionnelles, comme des carénages d'ailes.



Figure 8.4 Panneau renforcé par des longerons en CFRP [Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

Ces pièces composites sont souvent assemblées à partir d'une variété d'éléments individuels, tels que des panneaux de revêtement, des longerons et des longerons, afin d'obtenir un poids minimal. L'intégration d'éléments individuels supplémentaires dans un composant final se distingue par deux concepts de conception plus monolithiques :

Conception intégrale

Conception différentielle

La conception sandwich pourrait être considérée comme une troisième variante ; cependant, il nécessite l'utilisation d'un matériau supplémentaire et diffère donc en principe des conceptions monolithiques.

Conception intégrale

La conception intégrale est un processus d'intégration en une seule étape, c'est-à-dire. c'est-à-dire que tous les éléments individuels tels que les panneaux de revêtement, les longerons et les longerons sont assemblés en une seule étape puis durcis pour former le composant final (Figure 8.5). Cela nécessite que les éléments individuels soient encore à l'état non durci. C'est pourquoi cette méthode est également appelée méthode soft/soft. variation (voir section 6.4.2.1). Ici, « soft » décrit l'état des éléments individuels, c'est-à-dire. e., l'état non guéri.

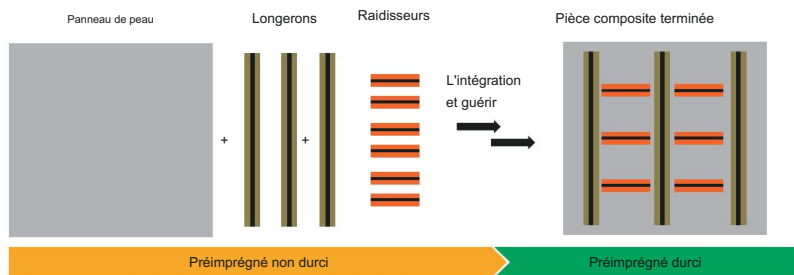


Figure 8.5 Processus d'intégration en une seule étape pour les éléments non durcis

L'avantage de cette conception réside dans le fait que des composants hautement intégrés, c'est-à-dire. c'est-à-dire que les composants constitués de nombreux éléments peuvent être fabriqués en conservant une construction légère. Diverses autres fonctions peuvent également être intégrées, telles que des douilles filetées à des fins d'assemblage. L'intégration en une seule étape des longerons et des nervures dans un panneau de peau permet de réduire le nombre d'éléments individuels qui devraient être assemblés après durcissement.

Un inconvénient de cette technologie est le fait qu'elle nécessite des efforts d'outillage très importants (voir également la section 8.1.2). Le moule et toutes ses pièces individuelles sont très étroitement alignés et même le plus petit changement, par ex. par exemple, en termes de géométrie ou de stabilité dimensionnelle, peut conduire à des composants défectueux. Dans le même temps, le niveau élevé d'intégration signifie également que le risque de défauts, tels que des vides, dans le composant final augmentera, car aucun des composants individuels ne peut être testé avant le durcissement.



Figure 8.6

Panneau de revêtement avec profils de longerons
intégralement collés

Conception différentielle

Les conceptions différentielles sont des processus d'intégration en plusieurs étapes. Ici, les composants durcis, tels que les longerons, sont combinés avec un panneau de peau non durci et liés au panneau de peau pendant qu'il durcit (Figure 8.7). Dans une étape ultérieure, les nervures sont intégrées. Ce concept de conception est également appelé rigide/souple ou souple/rigide, selon la pièce à assembler qui est déjà durcie.

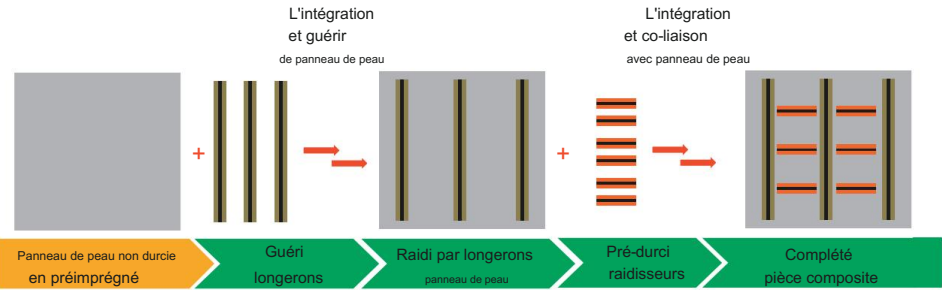
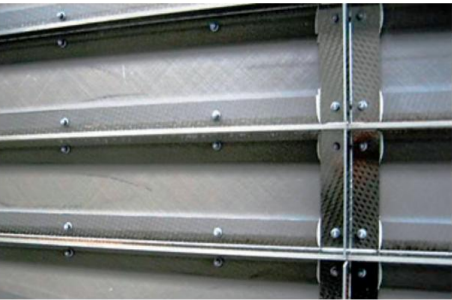


Figure 8.7 Processus d'intégration en plusieurs étapes utilisé pour les conceptions différentielles

L'avantage de cette conception réside dans le fait que tous les éléments déjà durcis avant l'intégration peuvent être testés pour détecter des défauts. Par conséquent, ces pièces défectueuses sont rejetées avant l'intégration, ce qui revêt une importance capitale pour les composants volumineux et très coûteux de l'industrie aéronautique, où les coûts des composants atteignent entre 40 000 et 950 000 dollars. Un autre avantage réside dans les moules considérablement plus simples pour la fabrication de tels panneaux. Ici, des composants individuels, tels que des longerons ou des panneaux de revêtement, peuvent subir des modifications de conception sans nécessiter un nouvel outillage complet.

Un inconvénient de cette approche réside dans le fait que la fabrication individuelle des longerons et des nervures entraîne généralement des coûts supplémentaires élevés. Le poids des composants est également souvent supérieur à celui réalisable en utilisant des concepts de conception intégraux. De plus, après collage sur la peau préimprégnée, les composants pré-durcis doivent être fixés par des rivets afin de respecter les réglementations aéronautiques, car les pièces d'accouplement sont liées par adhésif plutôt que par cohésion.



Graphique 8.8
Longeron sur panneau de revêtement avec rivets supplémentaires [Autorisation : Airbus Operations GmbH]

8.1.3 Concepts de moule ouvert

Indépendamment du concept de conception (concept intégral/différentiel), le durcissement des préimprégnés s'effectue souvent dans des moules ouverts. La pression nécessaire à la consolidation du stratifié est appliquée via un autoclave (voir également chapitre 5). Les deux concepts de conception peuvent également être utilisés avec des moules fermés, par ex. par exemple, les processus de formage à la presse et SQRTM. Nous décrivons plus en détail la variante à moule ouvert, car elle offre plus de flexibilité en termes d'intégration de composants individuels (par exemple, panneau de peau ou longerons).

Comme détaillé dans la section 6.4.2, le principe du moule ouvert peut être distingué en trois variantes couramment utilisées en ce qui concerne les différents états de durcissement, par ex. par exemple, éléments de longerons et panneaux de revêtement :

- a) rigide/souple (stringer durci, panneau de peau non durci)
- b) souple/rigide (stringer non durci, panneau de peau durci)
- c) doux/doux (les deux parties en contact non durcies)

Les variantes (a) rigide/souple et (b) souple/rigide sont équivalentes aux concepts de conception différentielle qui viennent d'être décrits ; cependant, ils se distinguent avec plus de précision en ce qui concerne l'état de durcissement des pièces en contact. La variante c) soft/soft représente des conceptions intégrales.

En fonction de l'état de durcissement (a à c) des éléments de longerons, des outils supplémentaires sont nécessaires pour leur intégration afin de répondre aux exigences des longerons sur le panneau de peau en termes de tolérances de forme et de position. Le sac sous vide sur la surface supérieure du composant crée toujours une fermeture vers l'autoclave.

Variation rigide/souple (a)

La variante rigide/souple convient particulièrement aux conceptions légères de panneaux de revêtement renforcés par des longerons, tels que les revêtements d'aile ou les revêtements d'empennage verticaux (Figure 8.9, à gauche). Ici, l'objectif est de s'assurer que les longerons respectent les tolérances requises en termes de position et d'orientation sur le panneau de peau. A cet effet, les longerons sont placés à l'aide d'un dispositif de positionnement laser ou d'une butée coudée puis fixés avec du ruban adhésif.

La variation rigide/souple peut être davantage distinguée dans différentes options de configuration.

Type 1 : Création du vide via une membrane en film jetable

Le film sous vide est drapé sur toutes les âmes de longerons en suivant la géométrie afin qu'il s'adapte à toutes les surfaces. Le pontage du film d'ensachage entre la bande de longeron et le panneau de peau doit être évité, car une fois la pression de l'autoclave appliquée (7 à 10 bars), cela pourrait entraîner une rupture du film ou une déformation de la bande de longeron (Figure 8.9, à droite). Dans les deux cas, le composant serait défectueux. Cette variante est fréquemment utilisée pour les composants de grande surface en raison de sa simplicité et de sa petite taille.

nombre de matériaux auxiliaires nécessaires. Avec un drapage correct de la membrane jetable (courbe d'apprentissage), il est possible d'obtenir de très bons résultats en termes de qualité des composants et de reproductibilité.

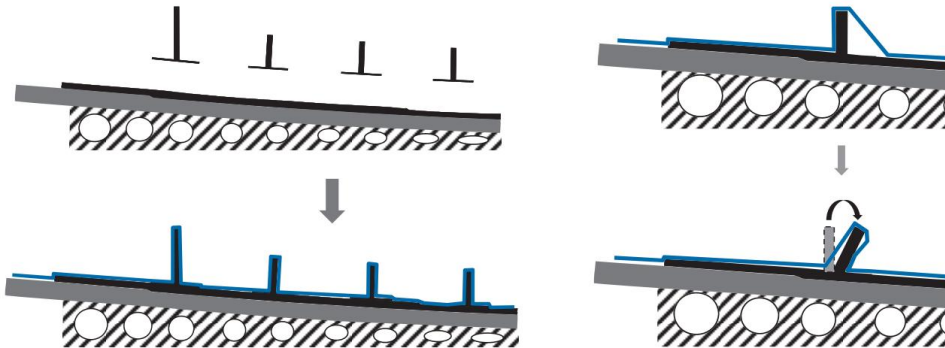
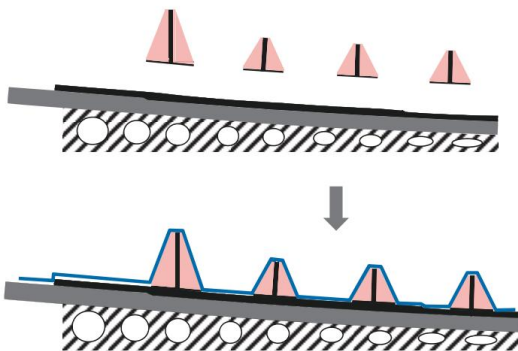


Figure 8.9 Création du vide avec sac sous vide uniquement (à gauche), pontage du film d'ensachage (à droite)

Type 2 : Création du vide via un sac en film jetable et des équerres en silicone

En tant que modification du type 1, des équerres en silicone peuvent être utilisées au niveau des pieds des longerons pour faciliter le drapage de la membrane élastomère jetable (Figure 8.10). Ils empêchent le déplacement ou l'inclinaison des pieds des longerons.



Graphique 8.10

Création du vide via un sac en film et des équerres en silicone

Type 3 : Création du vide via un sac en film et une plaque de calfeutrage découpée

Une autre variante de moule ouvert utilise une plaque de calfeutrage en métal ou en CFRP (Figure 8.11). Ici, la plaque de calfeutrage facilite le positionnement ainsi que la fixation des longerons pré-durcis sur la pile de préimprégnés pendant le durcissement dans l'autoclave. Cette variante pourrait presque être qualifiée d'approche de moule fermé, car une partie de la surface supérieure de la pile de préimprégnés est entièrement recouverte par l'outil de mise en forme. Cependant, comme pour toutes les autres variantes, l'étanchéité est assurée par une membrane jetable. Ici, il serait également possible d'utiliser un sac sous vide réutilisable en silicone. Le calfeutrage

la plaque sert de feuille de pression sur le stratifié. Selon le type de plaque de calfeutrage (mandrin rigide ou souple), les pieds des longerons prédurcis peuvent s'enfoncer dans le stratifié. Cela conduit généralement à une pression excessive dans l'empilement de préimprégnés sous les pieds des longerons, ce qui déplace le rapport fibre/matrice (généralement 60 : 40) en faveur d'une teneur en fibres plus élevée. Cependant, la plaque de calfeutrage crée une surface lisse et définie qui peut être nécessaire pour les étapes d'assemblage ultérieures.

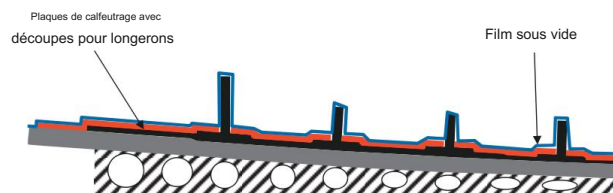
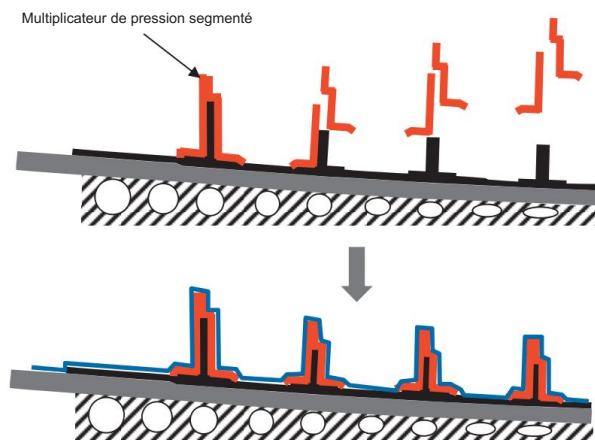


Figure 8.11 Création du vide via un sac en film et une plaque de calfeutrage découpée

Variation souple/rigide (b)

Lorsque des variantes souples/rigides sont utilisées, des longerons non durcis (souples) sont placés sur un stratifié préimprégné prédurci puis durcis (Figure 8.12). Cette méthode est particulièrement adaptée aux composants très profilés, tels que les revêtements sous les ailes et les stabilisateurs horizontaux.

Les longerons en forme de T sont soutenus des deux côtés par des supports (amplificateurs de pression segmentés) en métal (Ni-36) ou en CFRP. Ces segments s'appuient contre le stratifié de base durci (Figure 8.13). Deux supports correspondants peuvent être forcés l'un contre l'autre à l'aide de clips de tension. Afin de répondre aux exigences de position et d'orientation, les extrémités du support sont souvent fixées à l'outil de moulage utilisé pour le stratifié de base. L'étanchéité (et la création du vide) est assurée par une membrane jetable, comme pour les autres variantes.



Graphique 8.12
Création de vide avec supports
en métal ou CFRP



Figure 8.13 Outillage pour l'intégration des longerons sur un panneau à peau CFRP [Autorisation : Premium Aerotec GmbH]

Variation douce/douce (c) — Conception intégrale

La variante souple/doux convient au collage et au formage/durcissement de deux segments de composants non durcis (par exemple, longeron et stratifié de base), voir Figure 8.14. Il peut être interprété comme une combinaison de plaque de calfeutrage et d'intensificateurs de pression segmentés (supports). Ici, des mandrins de durcissement (principalement Ni-36 ou CFRP) sont utilisés pour soutenir les pieds des longerons et fournir une surface définie et tolérancée pour le stratifié de base. Cette dernière est souvent nécessaire pour faciliter les étapes ultérieures de montage. Le même principe est appliqué pour les mandrins modulaires (Figure 8.15). En plus des mandrins rigides, du caoutchouc ou du silicone (mandrins souples) peuvent également être utilisés ; cependant, en raison de leur forte usure, ils sont utilisés moins fréquemment.

Afin de minimiser leur poids (notamment pour les mandrins Ni-36) et d'améliorer l'échauffement, les mandrins de polymérisation peuvent être équipés de chambres alésées sur toute leur longueur (en fonction du diamètre et de la longueur). Comme dans les autres variantes, l'étanchéité est assurée par un sac sous vide à membrane jetable. Cette variante est également appelée conception intégrale, car divers éléments géométriques peuvent être durcis ensemble en une seule étape. D'autres modifications sont également possibles.

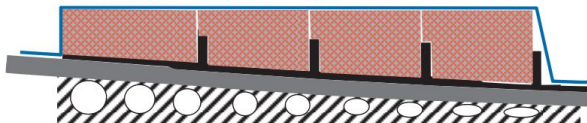


Figure 8.14 Création du vide avec un mandrin de polymérisation en métal ou en CFRP

Souvent, des mandrins de durcissement supplémentaires sont utilisés ; ils peuvent être des mandrels rigides ou souples et sont utilisés, par ex. par exemple, positionner les longerons non durcis sur un panneau de revêtement non durci dans des tolérances strictes de position et d'orientation (Figure 8.15) pour un durcissement ultérieur.

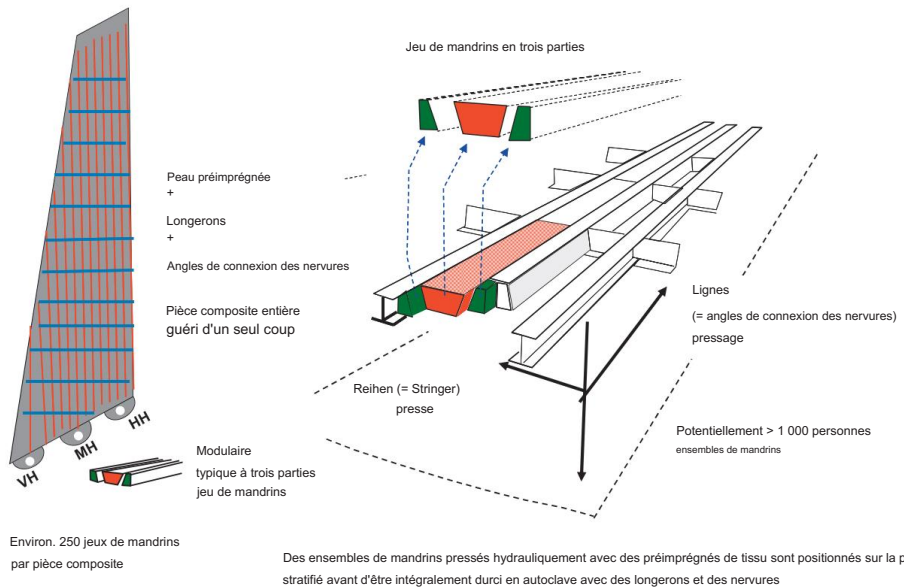


Figure 8.15 Mandrins de durcissement pour ailerons modulaires

La figure 6.18 montre un détail d'une telle dérive modulaire. Les doubles longerons en T ont été intégrés dans le panneau de revêtement en une seule étape avec les nervures (angle de raccordement des nervures).

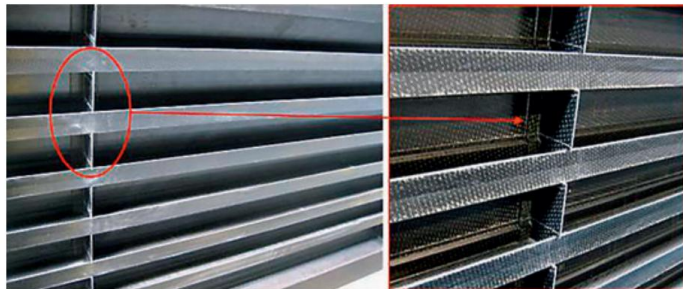


Figure 8.16 Détail de la dérive modulaire [Autorisation : Airbus Operations GmbH, Stade]

8.2 Facteurs déterminants et interactions

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, diverses interactions entre les paramètres du processus de fabrication, tels que les matériaux, la construction, la conception des composants, l'outillage et le processus, doivent être prises en compte. Ces paramètres et leurs interactions seront évalués et expliqués à l'aide d'exemples.

Seul un alignement optimal des paramètres individuels garantira la stabilité du processus et des composants zéro défaut. Dans ce qui suit, nous utiliserons des exemples pour évaluer et discuter de certains des facteurs déterminants potentiels.

8.2.1 Facteurs déterminants lors de la fabrication des composants

La figure 8.17 montre les influences potentielles sur le processus de fabrication et le composant final. Cela montre également clairement que les principaux facteurs d'influence, tels que le matériau préimprégné, incluent un certain nombre d'autres paramètres.

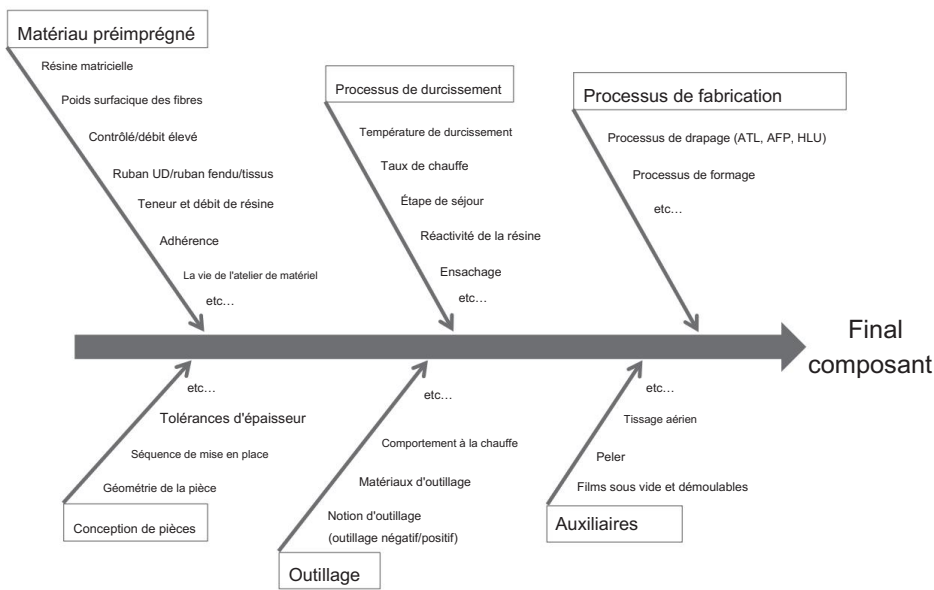


Figure 8.17 Paramètres influençant la fabrication de composants utilisant des préimprégnés

Il est difficile d'évaluer les facteurs individuels qui influencent le processus de fabrication en raison des interrelations entre les paramètres individuels. Un diagramme simplifié de ces interrelations est représenté à la figure 8.18. Avec la sélection d'un matériau préimprégné pour la conception d'un composant et sa configuration structurelle, le

processus de fabrication e. par exemple, ATL ou AFP) ainsi que le processus de durcissement sont également déjà définis.

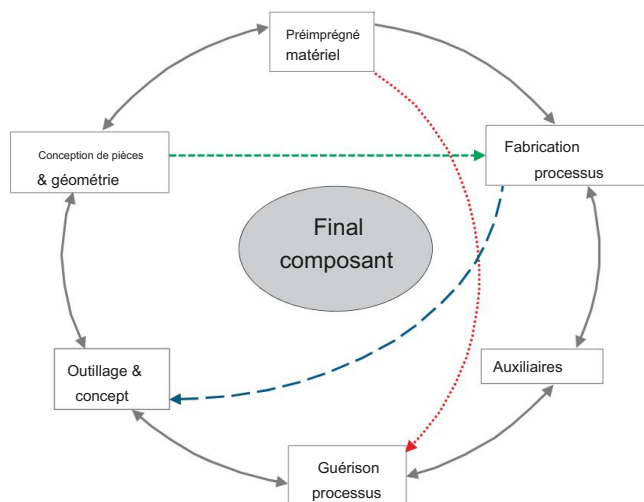


Figure 8.18 Interrelations potentielles des paramètres

À leur tour, le processus de fabrication et la conception des composants affectent le concept d'outillage. La conception du composant détermine déjà quelles zones du composant nécessitent une surface et une épaisseur de stratifié définies afin de faciliter les étapes d'assemblage ultérieures. La taille des composants et la technologie de fabrication sélectionnée déterminent le concept de conception (voir ci-dessus) et l'outillage. Ici, une attention particulière doit être accordée à la productivité de l'ensemble du processus de fabrication. Le processus de durcissement du composant est souvent un goulot d'étranglement sous-estimé.

Par exemple, l'utilisation d'outils métalliques entraîne des vitesses de chauffage et de refroidissement lentes et donc de longs cycles de durcissement (voir également la section 5.2). Le choix de matériaux auxiliaires peut même aggraver cet effet en raison d'une isolation thermique supplémentaire potentielle. Dans le même temps, le cycle de durcissement (chauffage lent ou rapide) ainsi que les auxiliaires utilisés (couche de pelage, tissage à l'air) affectent la qualité interne du stratifié.

Des interactions défavorables entre le contrôle du processus, l'outillage et les matériaux peuvent entraîner des problèmes tels que la porosité, l'ondulation, la déformation des fibres ou même des fissures dans le composant. On rencontre également un écoulement trop ou pas assez important de résine avec les écarts par rapport aux spécifications en termes d'épaisseur du stratifié.

Les expériences acquises sur env. 70 ans de fabrication de composites permettent des hypothèses relativement bonnes. Cependant, les facteurs déterminants ne sont pas toujours liés comme prévu ou souhaité.

8.2.2 Interrelations lors de la fabrication des composants

Dans ce qui suit, nous utiliserons trois exemples pour évaluer les corrélations entre les facteurs déterminants et leurs causes et conséquences potentielles pour la fabrication de composants CFRP. Ces exemples sont basés sur des expériences pratiques et non sur des découvertes scientifiquement étayées. Chaque processus de fabrication des composants CFRP présente des différences individuelles, apparemment minimales. Les relations complexes ne sont souvent pas évidentes, de sorte que les causes décrites ne sont peut-être pas les seules initiatrices mais doivent plutôt être considérées comme des explications des phénomènes rencontrés.

Interrelations lors de la fabrication des profilés en U

Les effets mutuels de la conception des composants, du matériau, du concept d'outillage et du cycle de durcissement seront décrits en utilisant la fabrication de profilés en U comme exemple (Figure 8.19). Deux profils en U peuvent être utilisés, par ex. par exemple, pour former un double longeron en T.

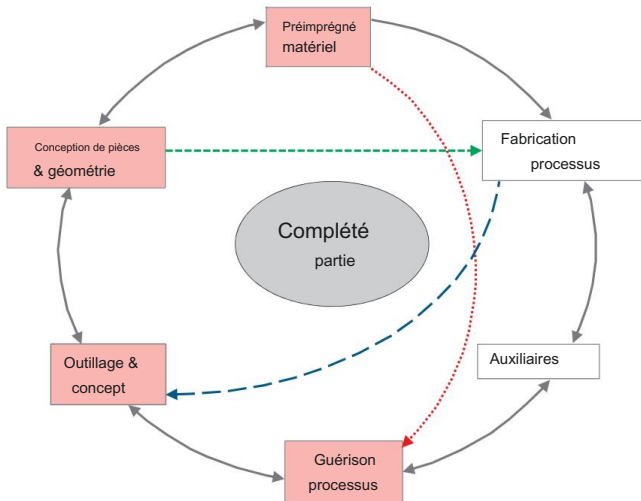


Figure 8.19 Effets de la conception, du matériau, de l'outillage et du processus de durcissement sur le composant

Ces longerons sont souvent utilisés comme éléments de renfort de panneaux de peau dans l'industrie aéronautique. Ici, ils doivent offrir une rigidité élevée dans la direction axiale (dans l'âme), tout en étant légers. La rigidité est obtenue, par ex. par exemple, grâce à des paramètres géométriques tels que la hauteur de l'âme et l'épaisseur du stratifié dans l'âme et le pied des longerons. Afin de répondre à ces exigences, la structure stratifiée du profilé en U présente une teneur élevée en couches 0° dans la direction axiale, c'est-à-dire en couches 0° dans le sens axial. e., sur le Web. L'augmentation du contenu de la couche 0° dans l'âme du longeron est un écart délibéré par rapport à une structure stratifiée quasi-isotrope (Figure 8.20). Si une structure stratifiée quasi-isotrope était choisie (c'est-à-dire, même teneur de 0° , 90° et

$\pm 45^\circ$ couches, Figure 8.21), la même rigidité nécessiterait une épaisseur de stratifié plus élevée et conduirait ainsi à un poids plus élevé.

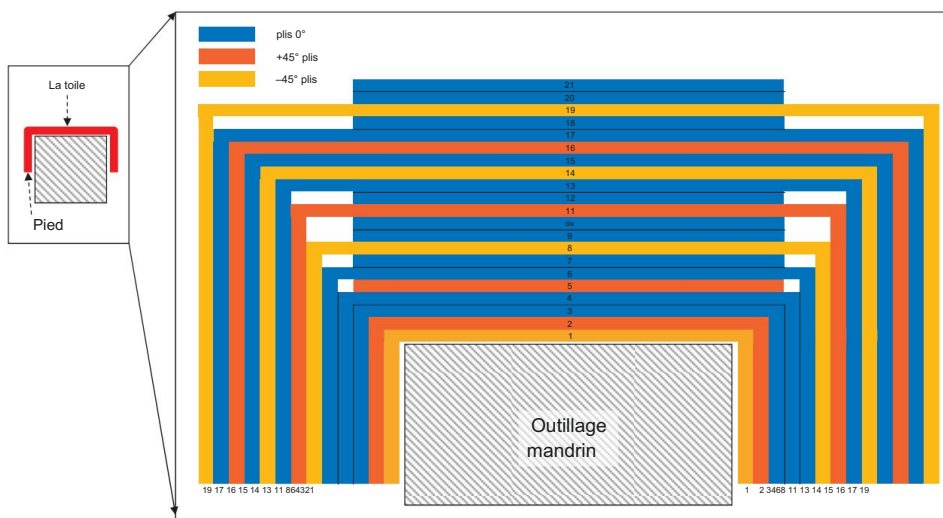


Figure 8.20 Création d'une couche pour un profil en U avec un contenu élevé à 0° dans le Web

Sur la base d'un poids surfacique de préimprégné de 194 g/m^2 , l'élimination des couches supplémentaires à 0° dans la bande réduira le poids dans les pieds d'env. $1,5 \text{ kg/m}^2$.

Le formage à chaud (Chapitre 4) est utilisé pour mouler des piles de préimprégnés plats sur un mandrin, fabriqués par ex. par exemple, du Ni-36, dans des profils en U. Pendant le cycle de durcissement, le mandrin reste dans le composant pour faciliter le moulage. Pour la fabrication de doubles longerons en T, deux profilés en U sont collés dos à dos dans un autoclave pendant le durcissement. Le double profil en T créé est ensuite séparé le long de la bande en deux moitiés égales.

Le choix du matériau pour les mandrins de durcissement, en combinaison avec la structure des couches déjà déterminée, affecte la relation entre les composants et l'outillage pendant le cycle de durcissement. Tant que la pile de préimprégnés n'est pas durcie, elle peut se déplacer librement avec l'expansion du mandrin de durcissement pendant la phase de chauffage. Une fois le stratifié durci, il présente ses propres caractéristiques de dilatation thermique, qui peuvent différer fortement des caractéristiques de dilatation de l'outillage métallique, en fonction de la structure des couches. La figure 8.21 montre le comportement de dilatation thermique de divers métaux ainsi que celui des stratifiés CFRP en fonction de l'orientation et de la position du pli sélectionné.

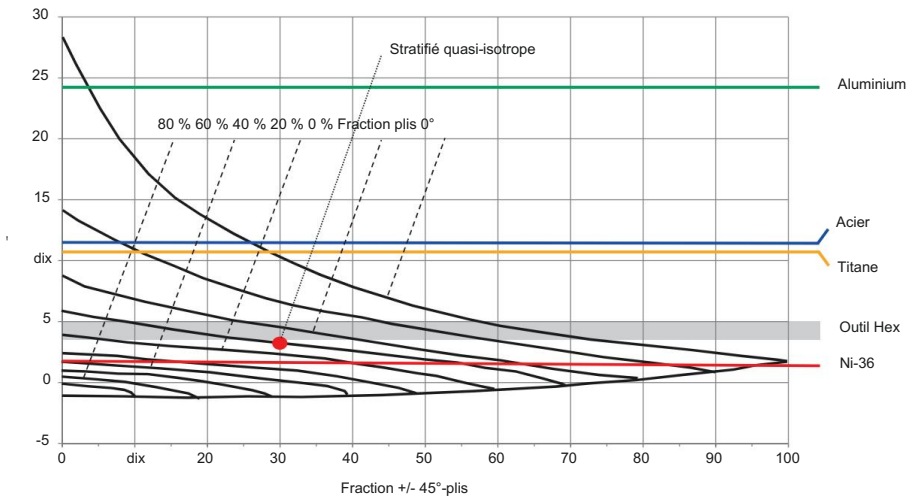


Figure 8.21 Coefficient de dilatation thermique du CFRP en fonction de l'orientation et de la position du pli

Le nomogramme de la figure 8.21 montre le comportement d'expansion des stratifiés CFRP en fonction du contenu de la couche dans une orientation $\pm 45^\circ$ et 0° . Le contenu de la couche à 90° peut être calculé sur la base du contenu des autres couches. Le point rouge marque une structure stratifiée quasi-isotrope (QI-) composée d'env. Contenu de couche de 30 % dans chaque orientation. L'axe des y montre le coefficient de dilatation thermique (CTE) pour chaque structure stratifiée. La figure montre clairement que le CTE d'une structure QI est proche du CTE du Ni-36 et de HexTOOL®. Cependant, pour la structure de couches décrite dans l'exemple ci-dessus, le CTE dans le sens axial est négatif, tandis que dans le sens latéral (transversal à l'axe du profil en U), le CTE est supérieur à ceux de HexTOOL® ou du Ni-36 (Figure 8.22).

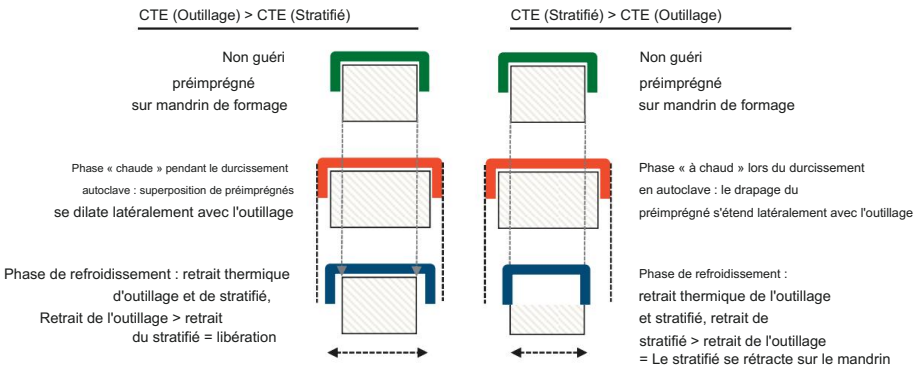


Figure 8.22 Retrait thermique de l'outillage et du stratifié

Ce dernier signifie que le stratifié durci se rétractera sur le matériau d'outillage sélectionné pendant le durcissement. Cela peut provoquer des contraintes importantes et conduire à des fissures dans les couches de fibres (Figure 8.23). L'inadéquation du comportement au retrait peut être réduite par la sélection d'un matériau d'outillage avec un coefficient de dilatation thermique supérieur à celui du composant, ce qui simplifiera également l'opération de démoulage du mandrin et du profil en U.

Une autre approche pour atténuer cet effet consiste à modifier la conception de la pile de préimprégnés. Au lieu d'une pile en forme de U, deux piles en forme de L pourraient être traitées sur un seul mandrin. La séparation évite les contraintes causées par la dilatation thermique et le retrait. Cependant, le processus doit être réévalué en termes d'automatisation, de flexibilité potentiellement réduite, de temps de cycle plus longs, ainsi que de précision possible du positionnement de la pile sur le mandrin.

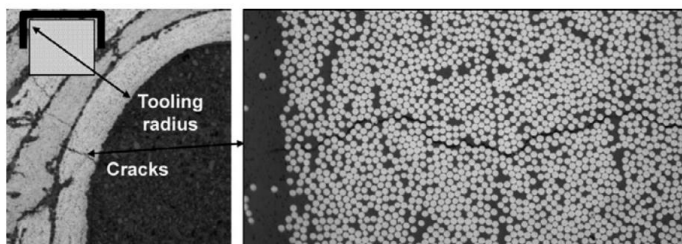


Figure 8.23 Fracture interfibre dans la zone du radius

La conception des outils peut également créer des défis supplémentaires. Pour vous assurer que les moitiés de l'outillage sont correctement alignées, une goupille métallique peut être fixée à l'extrémité du mandrin supérieur (ou inférieur) qui s'insérera dans la bague correspondante de l'autre moitié du mandrin (Figure 8.24).

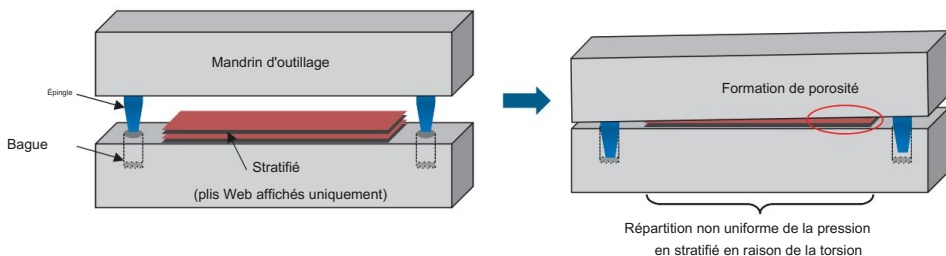


Figure 8.24 Désalignement des mandrins de polymérisation et formation de porosité

Si les tolérances pour la goupille et la douille (manchon de montage) sont trop étroites, les mandrins peuvent déjà être tordus au premier contact, de sorte que le mandrin supérieur ne peut plus se déplacer librement dans la direction z. Cet effet peut même s'intensifier avec la chaleur

expansion pendant le cycle de durcissement. La mobilité limitée et/ou la torsion peuvent provoquer de légères différences de répartition de pression dans le stratifié placé entre les mandrins et ainsi la formation de porosités dans certaines régions du composant. Cet effet peut être atténué en utilisant des agencements de roulements fixes/flottants.

Le roulement fixe peut être fixé à une extrémité du mandrin sous la forme d'une goupille/ combinaison de bagues, tandis que le roulement flottant peut être situé à l'autre extrémité du mandrin sous la forme d'une combinaison trou/goupille allongée qui crée un roulement flexible et empêche la torsion. Les broches peuvent également prendre des formes sphériques de part et d'autre du mandrin, offrant une géométrie qui ne facilite pas la torsion, contrairement aux broches droites.

Interrelations : exemple de structure réalisée à partir d'un plan négatif

Le processus de fabrication d'un composant de conception négative (Figure 8.25, à droite) sera utilisé dans ce qui suit pour décrire l'influence mutuelle de la géométrie du composant, du matériau et du concept d'outillage.

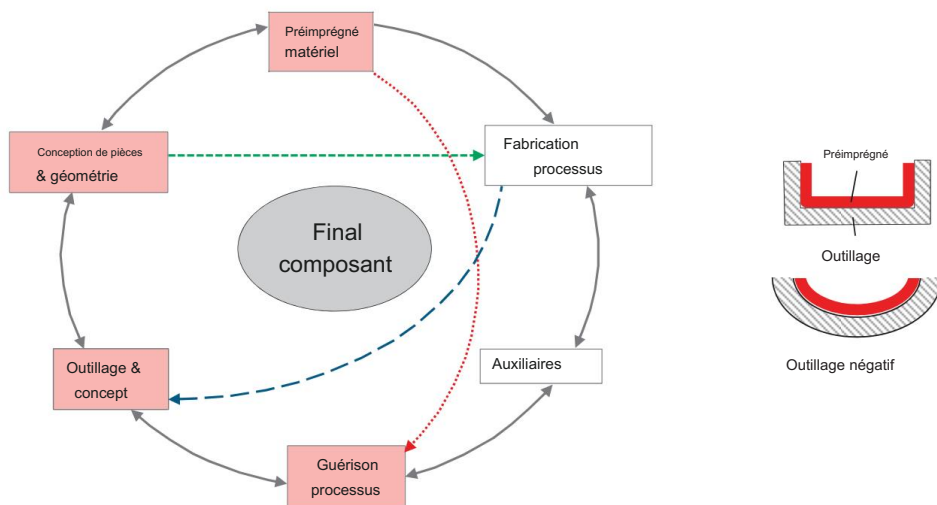


Figure 8.25 Effets de la géométrie, du matériau et du concept d'outillage sur le composant

Ici, les spécifications de conception exigent une surface extérieure lisse du composant (surface tolérée) pour l'assemblage ultérieur ; par conséquent, une conception d'outillage négative est sélectionnée. Le matériau préimprégné est placé dans la cavité du moule et les côtés sont façonnés pour créer un profil en U. Afin d'augmenter le collant pour une meilleure transformabilité (Chapitre 3), un niveau d'imprégnation inférieur peut être sélectionné, c'est-à-dire. c'est-à-dire qu'une plus grande proportion de résine préimprégnée se trouve à la surface du lit de fibres plutôt que de mouiller toute la couche de fibres (Figure 8.26). Cette imprégnation partielle se traduit par une « épaisseur humide » du pli préimprégné individuel plus grande que l'épaisseur du pli durci (CPT).

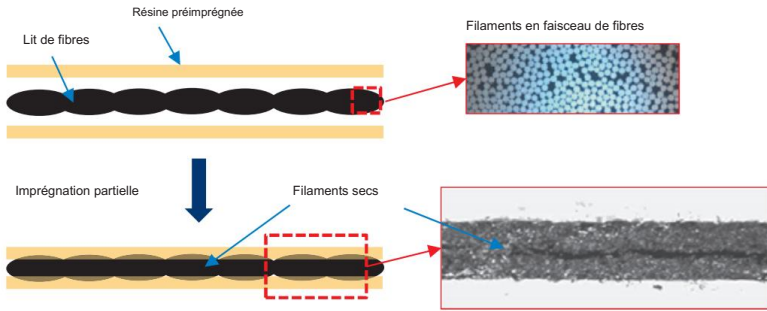


Figure 8.26 Préimprégné avec un faible niveau d'imprégnation

Lorsque plusieurs de ces plis préimprégnés (par exemple jusqu'à 20 à 30 plis individuels) sont laminés, l'effet « épaisseur humide » s'additionne nettement de sorte que pendant la phase de chauffage dans l'autoclave, l'empilement de préimprégnés subit une consolidation dans le sens de son épaisseur (Figure 8.27) et donc une post-imprégnation in situ (Figure 8.28).

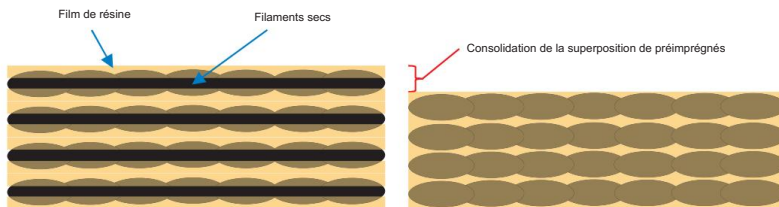


Figure 8.27 Consolidation de la pile de préimprégnés

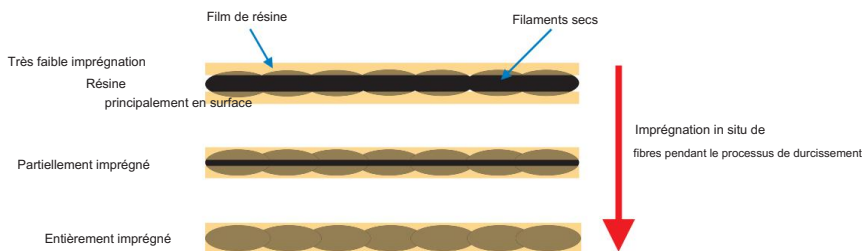


Figure 8.28 Imprégnation in situ pendant le cycle de durcissement

Cette consolidation dans le sens de l'épaisseur pose un problème car le stratifié est compacté dans toutes les directions simultanément. Ici, les plis les plus éloignés de l'outillage (plis intérieurs) parcourent une distance plus importante lorsqu'ils sont plaqués contre l'outillage et à gauche et à droite. Dans le même temps, on assiste également à une consolidation vers le bas (graphique 8.29).

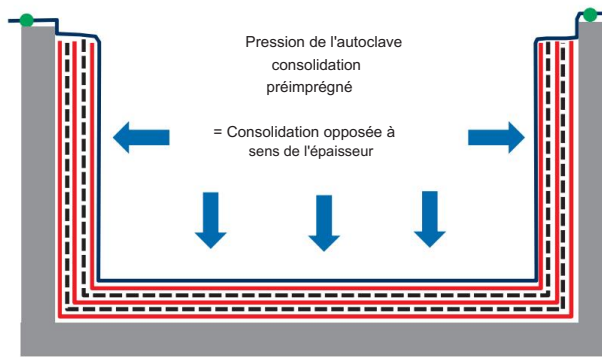
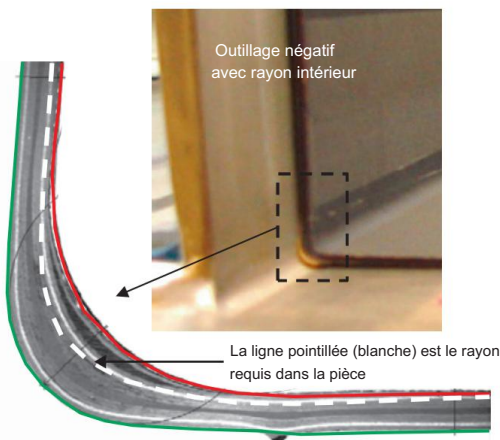


Figure 8.29 Consolidation et compactage à l'intérieur de l'outillage

Ainsi les plis intérieurs sont contraints de se dilater ou d'effectuer un mouvement relatif afin d'équilibrer le changement de longueur provoqué par la consolidation. Cependant, ils ne sont pas toujours en mesure de procéder à ces ajustements. La pression d'autoclave appliquée (généralement 7 à 10 bars) et la liaison entre les plis par la résine préimprégnée rendent impossible le mouvement relatif des plis individuels. Étant donné que la pression de l'autoclave est plus efficace sur le plan que sur les rayons, les plis internes du préimprégné combleront le rayon dans une certaine mesure, modifiant ainsi la progression de la force et la capacité de charge du composant (Figure 8.30). La ligne intérieure continue marque l'orientation réelle de la fibre, la ligne pointillée l'orientation requise de la fibre.



Graphique 8.30

Micrographie de la zone du rayon montrant l'effet de pontage des plis intérieurs

Ce problème peut être atténué par une ou plusieurs mesures. D'une part, l'utilisation d'un préimprégné avec un niveau d'imprégnation plus élevé peut minimiser la consolidation. Une autre approche consiste à fabriquer une pile de préimprégnés plats via ATL (plutôt que par superposition manuelle) et à former à chaud ultérieurement, ce qui faciliterait un pré-compaction de la pile avant le processus de durcissement. Encore un autre, bien que quelque peu controversé,

La méthode consiste à utiliser des bandes de pression (profilés d'angle en caoutchouc ou en silicone) dans les rayons. Il est possible d'augmenter efficacement la pression de l'autoclave dans cette zone à l'aide d'amplificateurs de pression sous forme de cordons ronds. Cependant, ils provoquent souvent de profondes empreintes indésirables dans le stratifié ou la formation de perles dans la bordure. zone des bandes de pression.

Interrelations : exemple de structure sandwich

Les interrelations entre la conception des composants, le matériau et le processus de durcissement ainsi que leurs implications seront décrites en utilisant une structure sandwich comme exemple.

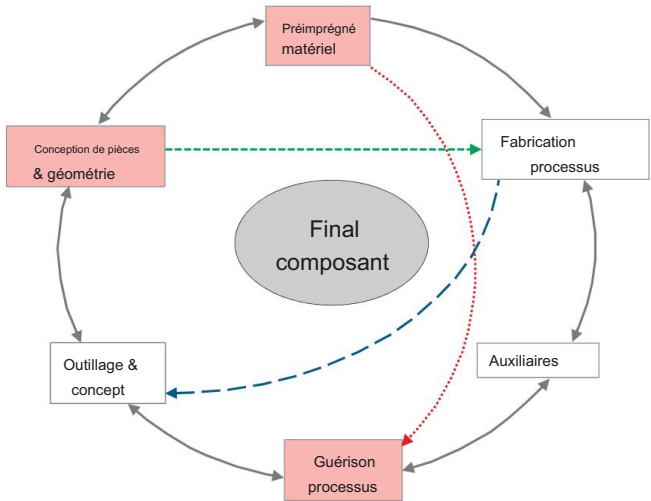


Figure 8.31 Effets de la conception, du matériau et du processus de durcissement sur le composant

Les mousses rigides PMI (Evonik) peuvent être utilisées pour la fabrication des longerons Omega (Figure 8.32). Généralement, la mousse formée reste dans le composant après le durcissement du préimprégné, ce qui permet un durcissement en une seule étape du longeron et du segment de peau à renforcer.

Les parois cellulaires de certaines mousses rigides ne présentent pas une stabilité dimensionnelle suffisante aux températures (généralement 180 °C) et aux pressions (7 à 10 bars) requises pour le durcissement des préimprégnés. Par conséquent, la pression sur le composant est réduite à, par ex. par exemple, 3 bars absolus.



Graphique 8.32
Exemple de conception sandwich : Omega-stringer avec âme en mousse

Cependant, en fonction de la matrice du préimprégné, une pression élevée (7 à 10 bars) est nécessaire pendant le cycle de chauffage et de durcissement afin d'initier des forces de cisaillement sur le préimprégné et ainsi obtenir un débit de résine suffisant. Le flux de résine garantit que l'air emprisonné entre les plis du préimprégné ou entre le préimprégné et le noyau en mousse est éliminé avec l'excès de résine, facilitant ainsi l'absence de vide dans les composants.

La pression réduite dans le composant sandwich peut conduire à un écoulement réduit de la résine et, par conséquent, à la formation de vides, en particulier entre les plis unidirectionnels (Figure 8.33). La formation de vides est en outre favorisée par un chauffage lent ou rapide dans l'autoclave ainsi que par une création de vide inappropriée.

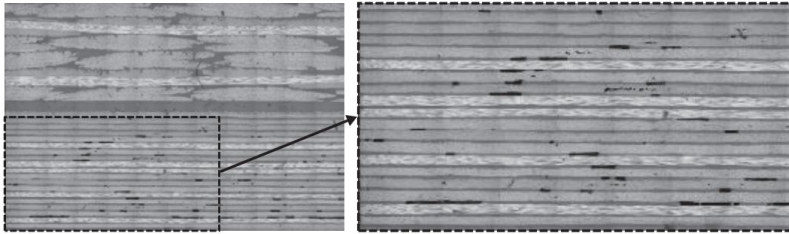


Figure 8.33 Vides dans les couches UD d'un composant sandwich

Le problème peut être résolu par un cycle d'autoclave spécialement adapté (rampe de chauffe, pression) et l'utilisation de mousses PMI résistantes à la pression. Une autre option consiste à utiliser des mandrins métalliques pour les opérations de formage.

Segments de peau renforcés par des longerons

Un bon exemple de l'interaction optimale entre les paramètres individuels sont les panneaux à peau renforcée par des longerons, fabriqués à l'aide de concepts de moule ouvert de conception intégrale ou différentielle (Section 8.1). Depuis plus de 20 ans, ces concepts sont utilisés avec succès dans l'industrie aéronautique pour fabriquer des composants de grande taille, tels que des revêtements pour empennages verticaux et, plus récemment, des carénages d'ailes.

Avec une expérience croissante dans la fabrication de composants composites, les matériaux, la conception et la fabrication, y compris le durcissement, ont été ajustés et coordonnés. Dans les premières étapes du développement et de la fabrication de ces composants, le manque d'expérience et de processus automatisés a fait des processus manuels la technologie de choix. Ici, le « facteur humain » a provoqué de grandes variations dans les composants finaux. Cependant, les connaissances acquises au cours de cette période profitent aujourd'hui au développement de composants composites. En particulier, la conception de composants adaptés aux matériaux renforcés de fibres a fait de grands progrès, compte tenu du fait qu'au début, ces composants étaient conçus en utilisant les principes traditionnellement utilisés pour les composants métalliques, ne tirant ainsi pas parti du potentiel offert par les matériaux CFRP. En ce qui concerne les limitations de transformabilité de

matériaux préimprégnés, de vastes connaissances et des compétences polyvalentes ont été acquises au fil du temps, ce qui permet aujourd'hui la production en série de, par ex. par exemple, composants d'avion. Les exemples actuels sont la dernière génération d'avions avec des fuselages en CFRP pour Airbus (A350XWB-900) et Boeing (B787-8).



Graphique 8.34

Fuselage CFRP de l'Airbus A350XWB

[Autorisation : Airbus Operations GmbH]

8.3 Références

- [1] G. Niederstadt. Construction écologique et écologique avec des polymères de qualité supérieure. Expert-Éditions, 1997.
- [2] U. Biéling. Serieneinsatz von Faserverbundwerkstoffen im Flugzeugbau, Dargestellt am Seitenleitwerk des Airbus (Discussion). Prague : 10. Conférence ICED, 1995.
- [3] H. Apmann. Vorteile durch CFK et Leichtbau. Présentation de l'entreprise Premium Aerotec GmbH, 2013.
- [4] MIL-Manuel-17-1E. Matériaux et procédés — Les effets de la variabilité sur les propriétés composites. 2002, chapitre 2, p. 1 à 69.

9

Conclusion

À l'avenir, il faudra trouver une approche plus intégrée pour l'ensemble de la chaîne de valeur représentant la fabrication de composants renforcés par des fibres, afin de rendre les plastiques renforcés par des fibres à haute performance plus compétitifs par rapport aux métaux et de les introduire sur des marchés plus larges. Cette approche doit inclure toutes les premières étapes du processus, telles que la conception de la matrice, des textiles et de la géométrie des composants, ainsi que les stratégies d'automatisation des processus qui reposent actuellement sur des opérations de superposition et d'assemblage manuelles. Cela signifie que les performances des matériaux, les exigences des processus, la fabrication et les fonctionnalités du composant doivent être considérées de manière globale. Un autre domaine d'intérêt est le développement de stratégies de recyclage éco-efficaces afin de minimiser l'utilisation inutile de matières premières coûteuses et/ou la création de déchets. On s'attend à ce que la recherche et l'industrie fassent résolument progresser ces questions au cours des 5 à 10 prochaines années.

Il existe déjà des premières approches réussies pour l'utilisation de fibres de carbone recyclées dans de nouvelles applications et composants. La figure 9.1 montre un prototype de composant sandwich dans lequel les feuilles frontales sont constituées de tapis de fibres de carbone provenant de fibres de carbone recyclées. Les applications possibles sont les panneaux de couverture dans les industries automobile et aéronautique, tels que les couvercles pour les compartiments supérieurs des avions.



Figure 9.1 Fibres recyclées dans une nouvelle application comme face d'un composant sandwich

Les auteurs

Dr-Ing. Hauke Lengsfeld



Après avoir terminé sa maîtrise en chimie et son doctorat au Département des matériaux polymères de l'Université de Bayreuth (Allemagne) (Conseiller : Prof. Dr.-Ing. Altstädt), Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld était responsable de la production de grands composants CFRP chez Airbus Operations GmbH en tant qu'expert en matériaux et processus. Il a été chef de projet pour le développement de composants CFRP pour l'Airbus A350XWB. Il a ensuite été responsable du marketing technique et des ventes chez Saertex Stade GmbH. Depuis 2010, il est responsable du support technique chez Hexcel Composites GmbH en Europe centrale. Depuis 2007, Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld est professeur adjoint et donne des cours sur les matériaux renforcés de fibres dans plusieurs universités.

Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt



Volker Altstädt a entrepris des études universitaires en physique et a obtenu le titre de Dr.-Ing. en 1987 avec le Prof. Dr.-Ing. Ehrenstein au département de génie mécanique de l'Université de Kassel (Allemagne). Pendant huit ans, il a dirigé le département de physique des polymères au sein de la division Développement des polymères chez BASF AG à Ludwigshafen. Depuis 1995, il est professeur de matières plastiques en génie mécanique et chef du département de polymères et de composites plastiques à l'université technique de Hambourg-Harburg. Depuis octobre 2000, il est professeur au Département de génie plastique de l'Université de Bayreuth.

Dr-Ing. Felipe Wolff-Fabris



Dr-Ing. Felipe Wolff-Fabris a étudié les sciences des matériaux à l'Universidade Federal do Rio Grande do Sul à Porto Alegre (Brésil) et à l'Ecole Centrale de Nantes (France). Après l'obtention de son diplôme, Dr.-Ing. Wolff-Fabris a travaillé au Département des matériaux polymères de l'Université de Bayreuth, dirigeant le groupe de recherche sur les « Thermosdurcissables et matériaux renforcés de fibres ». Il a travaillé comme responsable du laboratoire « Composites » chez Henkel AG, puis comme ingénieur principal à l'Université de Bayreuth. Depuis 2012, Dr.-Ing. Wolff-Fabris a dirigé le Centre européen de technologie de dispersion au Kunst-stoff-Zentrum SKZ.

Dipl.-Phys. Johannes Kramer



Johannes Krämer a obtenu sa maîtrise en physique et a travaillé au département de génie des polymères de l'université de Bayreuth sous la direction du professeur Dr.-Ing. Altstädt dans le domaine des thermosdurcissables et des plastiques renforcés de fibres. Depuis 2012, il travaille pour BASF SE dans le département de matériaux de structure, de recherche sur les matériaux et systèmes avancés à Ludwigshafen.

Dr-Ing. Javier Lacalle



Après avoir obtenu son Master en génie mécanique à l'Universidad Pública de Navarra à Pampelune (Espagne), Dr.-Ing. Javier Lacalle a obtenu son doctorat en 2005 au Département de mécanique de l'Université de Duisburg (Allemagne) (directeur : Prof. Dr. rer. nat. Manfred Braun). Jusqu'en 2011, il a travaillé chez M. Torres Diseños Industriales en tant que chef de projet et de produit pour les technologies de drapage. En 2010, il a obtenu un Master supplémentaire en sciences dans le domaine des matériaux composites de l'Université PFH de Göttingen à Stade. Entre 2011 et 2014, il a été chef de groupe pour les processus automatisés CFRP et pour la technologie AFP à l'Institut Fraunhofer de technologie chimique (ICT-FIL) à Augsburg et au département des composites de carbone de l'Université technique de Munich. Depuis mai 2014, il est chef de projet et consultant technique chez M. Torres Deutschland.

Indice

Symbole

Préimprégnés de 1ère génération 20
Procédé 2 films 34
Préimprégnés de 2ème génération 20, 43
Préimprégnés de 3ème génération 20, 40
Procédé 4 films 34
Préimprégnés de 4ème génération 20

UN

activation 77, 90 airpad
155
ALV 96
anhydrides 16
Aquacore 155 format
d'image 3
durcissement en autoclave
119 placement automatique des fibres (AFP) 83
pose automatique du ruban (ATL) 72 vitesse
moyenne de superposition 96

B

résines de bismaléimide (IMC) 17 aide au
saignement 117
IMC 138
pont 69, 78, 91 pont 91

Acide de Brønsted 130

C

Chaîne CAD-CAM 147 unité
de calandrage 31 calandrage
63 cantilever 70, 78,
91 mousse de carbone 138
films support 68 papier
support 73 outillage en
nickel coulé 141
polymérisation cationique 130
béton cellulaire 145

Mousse CFRP
– mousse carbone 138
outillage CFRP 148
nettoyage 158
moule fermé 153 moule
fermé durcissement 158 unité de
revêtement 31
coefficient de dilatation thermique 139,
189
colonne 70, 78, 91
peignes et barres d'écartement 33
compactage 77, 90
CPT 172
cantre 87
jeu de cantres 31
densité de réticulation 117
Longeron C 177
Épaisseur
de pli durci CTE 189 14, 172
– CPT 40
cycles de durcissement 115, 116

mandrin de polymérisation
183 moules de
polymérisation 153 technologies
de polymérisation
115 – autoclave 115 – processus hors
autoclave 115 test des
bords de coupe 168 système de coupe 76
– Technologie AFP 89 poste
de coupe/dégrossissage 31
Cycom® 977-2 23
Cycom® 977-3 23
Cycom® 997 23

D

degré de réticulation 16 concept
de conception 175
Technologie DFP 24
conception différentielle 177, 179
fabrication directe d'outils de formage
147
DMTA 171
double membrane 105
drapabilité 66, 165
Analyse thermique
mécanique dynamique Duratool 138
171

E

Ébalta 148

structure en carton d'œufs
– sous-structure 139
faisceau d'électrons 115, 118
durcissement par faisceau
d'électrons 130 bloc d'outillage
époxy 145 planches d'outillage
époxy 138 excès de
résine 118 exothermique 117

F

tissu préimprégné 13, 29
alliages de ferronickel 140
poids surfacique des fibres 14, 162

fibres 18
ondulation des fibres 19
teneur en volume des fibres 14, 169

G

portique 69, 78, 91
gélification 117
point de gel 118, 166
température de transition vitreuse 171
novolaques glycidylées 16
système de guidage 76
remplissage de gousset 103

H

caractéristiques de manutention
– outillages 136
changement de tête
88 répartition de la chaleur
117 rampe de chauffage 116, 117
HexPly® 913 23
HexPly® 914 23
HexPly® 8552 23
HexPly® M21 23
HexPly® M21E 22, 23
HexPly® M56 23
HexPly® M65 23
HexPly® M77 23
HexPly® M91 23
HexPly® M92 23
HexTOOL138
drapage à chaud 104 outil de
formage à chaud 151
procédés de fusion à chaud 30, 31
pression hydrostatique de la résine 121

niveau d'imprégnation 41, 192
fabrication indirecte d'outils de formage
148
processus d'induction 126
conception intégrale 177, 178
conception intégrale/différentielle 177

interactions 185
 préimprégné interfeuillet
 20 interrelations lors de la fabrication
 des composants 187
 INVAR
 – Pernifer 138
 isotherme 117, 121

L

lame 73

M

architecture de la machine 68
 moule principal 149
 système de guidage des
 matériaux 88
 matériaux 1 systèmes
 matriciels 15 vitesse de coupe
 maximale 90
 métaux 139 micro-ondes 118
 durcissement par micro-ondes
 127 intégration en plusieurs étapes
 179 multi-bande 80

N

FCN 20
 Necuron 138
 conception négative 175
 moule négatif 176
 outillage négatif 137
 imbrication
 53 moules nickel-galvano 150
 outillage nickel-galvano 141
 alliage nickel-acier 138
 nomogramme 189
 tissus non frisés (NCF) 19 non
 thermiques 132 non-
 tissés et tapis de fibres aléatoires
 29

Ô

OBO-Plywood 138
 programmation hors ligne
 61 oméga stringer 194
 découpe en ligne 76
 moule ouvert 153
 concepts de moule ouvert 180
 durcissement de moule
 ouvert 157 hors autoclave
 (OOA) 24
 durcissement au four 122
 largeur totale de pose 93 surchauffe 129

P.

résine phénolique 17
 photoinitiateurs 133
 armure toile 19
 livre de plis 55, 61
 polyéther éther cétone 15
 polyéther sulfone 15 film
 de polyéthylène 13
 polypropylène 15
 conception positive 175
 moule positif 175
 conception positive/négative 175
 outillage positif 137
 durée de vie
 en pot 115 diffusion de
 poudre 30 fibres pré-imprégnées
 13 préimprégné 11
 –AFP 84
 – poids surfacique 162
 –ATL72
 – processus de drapage automatisés 64
 – papier support 73 –
 drapabilité 66 –
 imprégnation 65 – ligne
 31 –
 méthodes de fabrication 31 – films
 antiadhésifs et supports 68 – rigidité
 66 – refente
 65, 85 – systèmes
 20 – collant 85

- largeur de bande 67, 73
- largeur de câble 85
- types 14 –
- variantes 38 moulage
- sous presse 125 profil de
- pression 121 technologie
- de traitement 47 simulation de
- processus 61 productivité 95
- taux de drapage
- surfacique 97 – vitesse
- moyenne de drapage 96 – du sol au sol 98 – productivité de
- drapage 95 – productivité de
- masse 97 – critères de
- productivité 99 – prix unitaire 99
- profil 103 pultrusion
- 100

Film PVF 163

Q

structure quasi-isotrope
189 structure quasi-isotrope 142
Technologie QuickstepTM 118, 123

R.

agents démoulants 158
papier antiadhésif 13
teneur en résine 14, 40, 162 flux
de résine 14, 162
viscosité de la résine 117
rigide/doux 157, 179
rigide/doux variation 180 robot
71, 79, 92

S

design sandwich 178
structure sandwich 194 tissage
satin 19
ferraille 85
rétractable 139
simple membrane 105

méthode à diaphragme unique 152
intégration en une seule étape 178
bande unique 80
bande fendue 20, 38
souple/rigide 157, 179
variation souple/rigide 182
souple/souple 157
variation souple/douce 178, 183
procédés de revêtement en solution 30
voie de solution 165
méthode de revêtement au solvant/immersion dans un solvant
36
module d'Young spécifique 6
SQRTM 111

T

portique de table 70, 79, 91
punaise 43, 85, 164
ruban adhésif 153
préparation du ruban 77
largeur du ruban 67, 73, 80
textiles 18
caractéristiques thermiques –
outillages 136
préimprégné thermdurci 29
temps-transition-température 166 contours
d'outillage 137 matériaux
d'outillage 138 technologie
d'outillage 135 fabrication
d'outils 146
Toolmaster BetaPreg 138
Toray® 3911 22, 23
largeur totale de drapage 81
pré-remorquage 20, 38, 39
largeur de remorquage 85, 93
Diagrammes TTT 166
tissage sergé 19

U

préimprégné unidirectionnel 27

V

- sac sous vide 119
- viscosité 166 teneur
en matières volatiles 165
- matières volatiles 165

W

- récupération d'eau 42
- test de récupération d'eau 168
- station d'enroulement 31

Z

- préimprégné sans saignement 14, 118