

Les composites : des matériaux d'avenir

Partie 10 : Les composites dans l'aéronautique

Abstract

Les composites d'origine naturelle sont utilisés depuis les débuts de l'aéronautique en raison de leur légèreté. Actuellement, l'utilisation de composites à matrice organique résulte du souci constant d'économie de carburant, donc d'énergie fossile. Néanmoins, la légèreté ne peut être obtenue aux dépens des autres propriétés. Sur le plan mécanique, le rapport entre les propriétés et la masse spécifique permet de comparer les matériaux entre eux, et cette comparaison est favorable aux composites. La résistance aux chocs (oiseaux) et les propriétés électriques (foudre) sont d'autres propriétés à optimiser pour les matériaux de structure, en particulier pour les composites polymère-carbone.

L'utilisation des matériaux composites est générale dans les pièces secondaires (bords d'attaque, flaps,...) et elle s'étend aux pièces de structure primaire comme le fuselage. Même pour les moteurs, les constructeurs se tournent maintenant vers les composites à matrice organique (dont les thermoplastiques) pour les pièces qui ne sont pas soumises à de trop hautes températures.

Les techniques de mise en œuvre des composites sont généralement des techniques sous pression et/ou à hautes températures (compression, (SQ)RTM, ATL, AFP, etc.) pour les résines thermodurcissables, et l'injection pour les thermoplastiques. Pour le futur, les nanocomposites et les matériaux hybrides multifonctionnels ouvrent de nouvelles perspectives.

Historique

Depuis les débuts de l'aviation, c'est à dire du vol d'engins « plus lourds que l'air », tous les constructeurs ont cherché à réduire le poids de leurs engins au minimum.

Celui qui est reconnu comme un des pères de l'aviation (et qui inventa, d'ailleurs, le mot « avion ») Clément Ader (1841-1925) construisit en 1890 son premier aéroplane (baptisé « Eole ») équipé d'un moteur à vapeur, d'une hélice en bambou, et d'ailes mobiles en toile, sans dépasser un poids total de 295kg. Déjà à ses débuts, l'aviation faisait donc usage de composites (naturels).

En 1903, les frères Orville et Wilbur Wright, modifièrent un planeur en l'équipant d'un moteur d'automobile léger. Ils firent ainsi voler un aéroplane baptisé « Flyer » dont les caractéristiques sont reprises au tableau 1 :


Flyer (Orville et Wilbur Wright)	Caractéristiques	
	Premier vol	17 décembre 1903
	Moteur	1
	Puissance	12CV (9kW)
	Envergure	12,29 m
	Longueur	6,43 m
	Hauteur	2,74 m
	Surface des ailes	47,5 m ²
	Masse à vide	274 kg
	Masse maximum (avec 1 pilote)	338 kg
	Vitesse maximale	43 km/h

Tableau 1 : Photographie du Flyer des frères Wright et caractéristiques techniques. Pour ces premiers « avions », dérivés des planeurs, le poids minimum a toujours été un souci majeur, en raison surtout, de la faible puissance des moteurs. La consommation en carburant est aussi directement liée à la masse de l'avion. La courbe de la figure 1 montre que, pour un avion de ligne, à vitesse constante, la consommation de fuel est, à une constante près, une fonction du carré de la masse transportée.

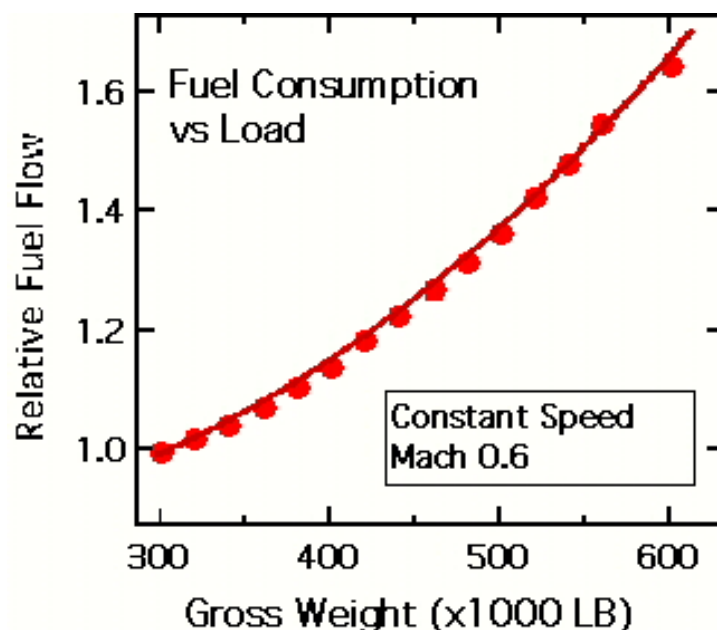
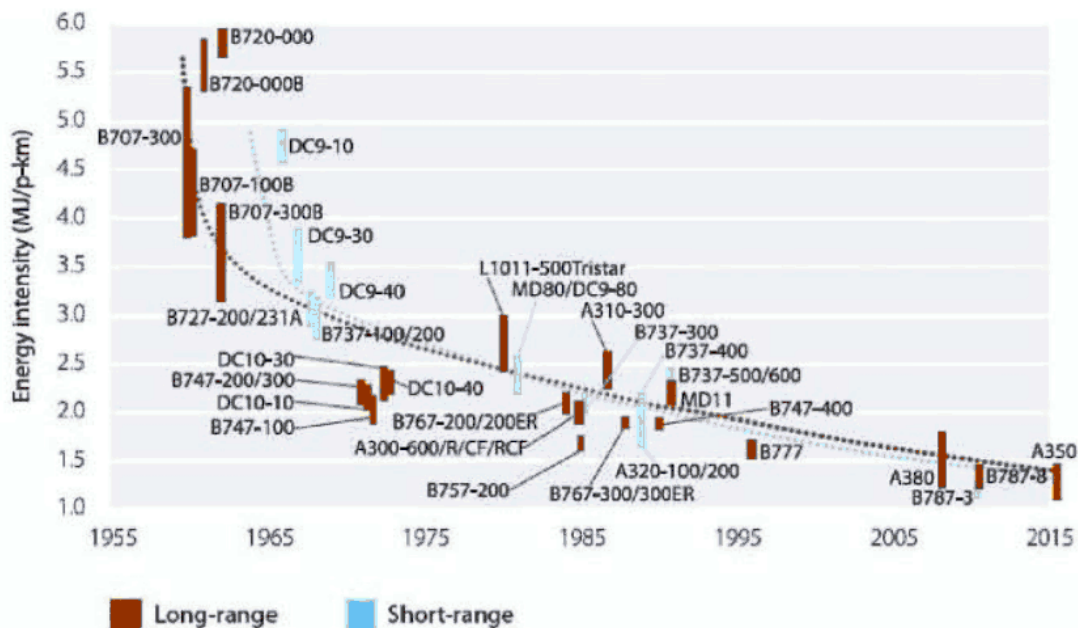


Figure 1: Consommation de carburant en fonction de la charge, pour un gros avion de transport naviguant à vitesse constante.¹

Après une période d'énergie « bon marché », durant la période 1955 – 1965, les crises pétrolières successives ont conduit, de nos jours, à réduire drastiquement la consommation des avions. La figure 2 montre que les avions modernes consomment jusqu'à quatre fois moins d'énergie par passager et par km qu'en 1960².

¹ <http://www.aviation-history.com/theory/lift.htm>

² <http://www.businessinsider.com/high-fuel-costs-help-boeing-and-airbus-2013-7>



Source: Lee, IATA

Figure 2 : Consommation énergétique des avions des 1955 à 2015.

Il est intéressant de comparer le taux de composites utilisés dans la fabrication de la structure des appareils modernes (figure 3) et d'observer la corrélation entre ce taux et l'économie d'énergie.

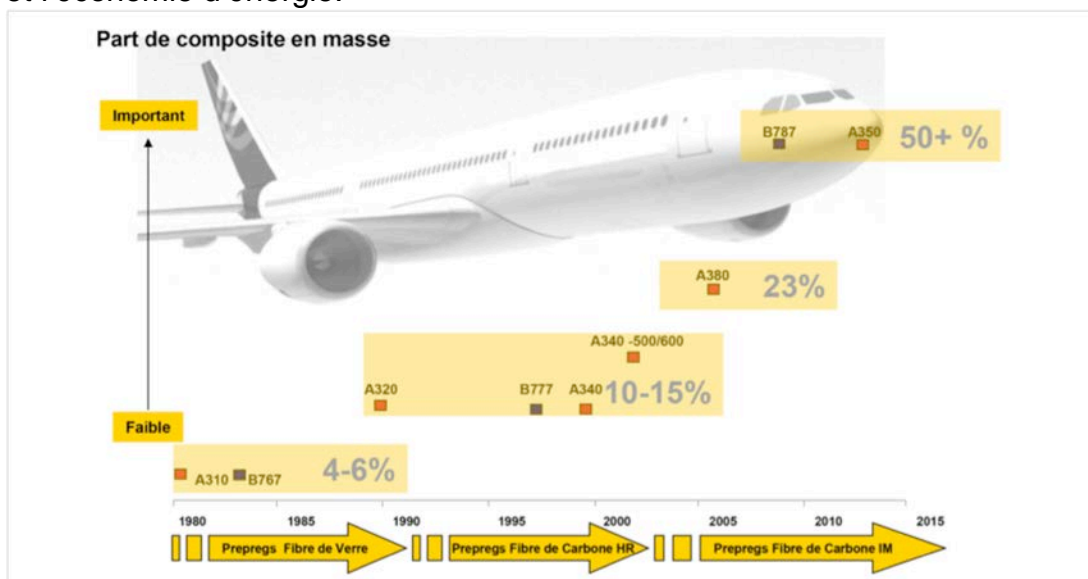


Figure 3 : Part des composites dans la structure d'avions civils modernes.³

En résumé, en aviation plus encore que dans d'autres domaines, la légèreté est un paramètre essentiel pour diminuer la consommation d'énergie, et, par conséquent, diminuer les coûts et l'impact écologique.

Matériaux de structure

³ http://asso-acit.fr/wp-content/uploads/2013/07/GROUPE_HEXCEL_ACIT_20132.pdf

Les matériaux utilisés pour réaliser la structure des avions doivent non seulement être légers, mais ils doivent être rigides, résistants et résilients (résistants aux chocs).

Le tableau 2 montre cependant que, généralement, les métaux les plus légers sont aussi les moins rigides et les moins résistants.

	Masse spécifique ρ (kg/dm ³)	Rigidité E (GPa)	Résistance σ (MPa)	Rigidité spécifique (E/ ρ)
C (Diamant)	3,5	1000	1050	285
(CH ₂) _n Polyéthylène	0,95	1	10-50	1,05
Aluminium (Al)	2,7	72	200-550	26,6
Titane (Ti)	4,5	110	800-1200	24,4
Acier (Fe)	7,8	200	400-1800	25,6

Tableau 2 : Masse spécifique, rigidité, résistance en traction et rigidité spécifique de matériaux de structure.

Fibre	Ex-PAN ⁴			Ex-Pitch ⁵	
	Ultra-haute résistance	Haute résistance	Haut module	Ultra- hautmodule	Haute ductilité
Rigidité E (GPa)	291	221	521	940	41
Résistance σ (GPa)	5,69	3,20	3,38	3,21	1,10
Rigidité spécifique	146	111	261	470	21

Tableau 3 : Rigidité (en traction), résistance en traction et rigidité spécifique de fibres de carbone élémentaires⁶ (masse spécifique : 2 kg/dm³).

Pour concilier masse et rigidité, il convient cependant de travailler en grandeurs spécifiques, c'est à dire, à masse spécifique égale. On obtient alors la quatrième colonne du tableau 2. On y observe que les métaux usuels présentent des rigidités spécifiques similaires, mais que le carbone(diamant) a une rigidité spécifique plus de dix fois supérieure à celle des métaux. Pour le carbone sp² (fibres de carbone composées de plans de graphène) orientées dans le sens des liaisons C-C, les valeurs sont aussi très élevées comme le montre le tableau 3. La meilleure rigidité spécifique peut donc être attendue de matériaux utilisant le carbone orienté. C'est la base de l'utilisation massive des composites à base de fibres de carbone dans l'aviation.

La résistance aux chocs (résilience) des matériaux de structure utilisés en aviation

⁴ Fabriquée à partir de PolyAcryloNitrile (PAN)

⁵ Fabriquée à partir de brai (Pitch)

⁶ Naito K., Tanaka Y., Yang J.M., Kagawa Y., from : <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings>

est un paramètre important. En effet, aux vitesses auxquelles volent les avions actuels, le moindre objet peut provoquer des dégâts parfois fatals (figure 4). Le cas le plus connu est celui des oiseaux qui heurtent les avions au décollage ou à l'atterrissage. La résilience des composites époxy-carbone, largement inférieure à celles des métaux, est un problème qui fait actuellement l'objet de recherches. Une voie de solution consiste à associer la résilience des thermoplastiques à la rigidité et à la mise en œuvre aisée des thermodurcissables^{7, 8}.



Figure 4 : Impact d'un oiseau sur l'aile d'un avion à structure métallique.

D'autres propriétés, comme la conductivité électrique des structures sont de plus en plus importantes dès lors que la fraction de métaux, bons conducteurs, diminue dans la structure. Ainsi la tenue des avions sous l'impact d'éclairs est un problème d'actualité avec les nouveaux matériaux composites moins conducteurs (figure 5). La résistance aux impacts de la foudre tout en évitant, autant que possible, un surplus pondéral, est un domaine qui nécessite encore des efforts de recherche. Les solutions proposées actuellement sont reprises au tableau 4⁹.

Solutions	Aluminium	Cuivre	Bronze
Grillage métallique		X	X
Métal expansé	X	X	X
Feuille métallique	X	X	
Métallisation	X	X	X

Tableau 4 : Solutions proposées pour la tenue à la foudre des composites.

⁷ PRIFORM® de CYTEC <https://www.cytec.com/businesses/aerospace-materials/brands/priform>

⁸ SKYWIN, projet « Plan Marshall », projets APC, ECOM, ECOTAC, ICOGEN

<http://www.skywin.be/?q=fr/projets-labelles>

⁹ Bréchet Y., cité dans : « Matériaux aéronautiques d'aujourd'hui et de demain ». Académie Air espace, Dossier #39 juin 2014 (<http://www.academie-air-espace.com/publi/newDetail.php?varID=235>)

a)



b)



Figure 5 :a)répartition de la charge électrique d'un éclair sur un avion à structure métallique. b) trace d'un impact de foudre réalisée en laboratoire sur une structure composite¹⁰.

Pièces d'avions en composites

Dans les avions de ligne modernes, la proportion de composites à matrice organique (CMO) dans les pièces de structure ne cesse d'augmenter. Les bords d'attaque des ailes, des ailerons et les « flaps » sont, depuis déjà longtemps réalisés en composites (Fig. 6).

¹⁰ <http://blog.dexmet.com/>



Figure 6 : Montage de l'aileron arrière du Boeing **787 Dreamliner**

Actuellement, c'est la structure même de l'avion qui est concernée. Dans le BOEING 787 DREAMLINER, le fuselage lui-même est réalisé en grande partie en composites (Figure 7)

Les constructeurs européens ne sont pas en reste, l'AIRBUS A350, concurrent du BOEING 787 a lui-même son fuselage réalisé en composites (Figure 8).



Figure 7 : Pièce de fuselage du BOEING 787 Dreamliner



Figure 8 : Pièce de fuselage de l'Airbus A350

Si les pièces de structure sont réalisées de plus en plus en composites à matrice organique (CMO), les pièces de moteur, soumises à des températures élevées ne peuvent, la plupart du temps être réalisées dans ce type de composite. Néanmoins, des composites à matrice céramique (CMC) peuvent y être utilisés.

Des pièces annexes du moteur, comme le compresseur basse pression (fig.9), peuvent être réalisées en composites, le plus souvent à matrice thermoplastique.

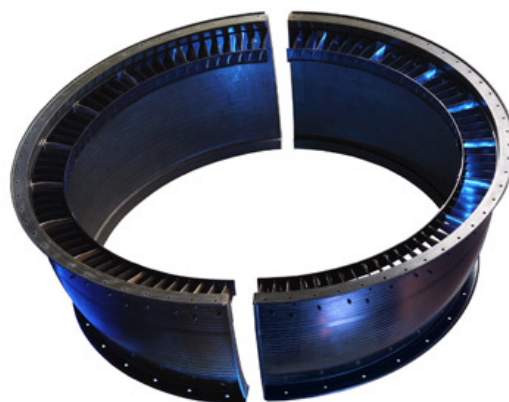


Figure 9 : Prototype de redresseur en composite pour compresseur basse pression (TechSpace aero, Groupe Safran)¹¹

Les composites sont néanmoins nettement de plus en plus présents dans la motorisation comme le montre la figure 10.

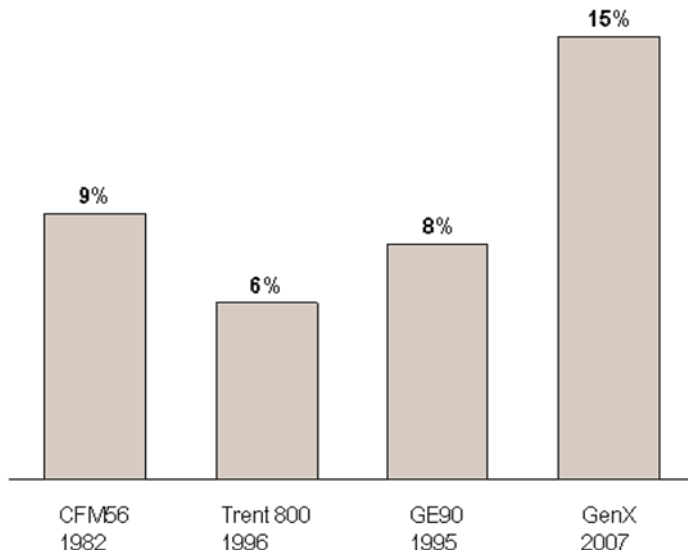


Figure 10 : Taux de composites dans les moteurs d'avion¹²

CFM56 : Groupe Safran : pales de ventilateur
Trent 800 : RollsRoyce : pales de ventilateur
GE90 : General Electric : pales de ventilateur
GenX : General Electric : pales et coque du ventilateur

Techniques de fabrication

Les résines thermodurcissables utilisées en aéronautique dépendent du cahier des charges (résistance mécanique, température d'utilisation, résistance au feu...) de chaque pièce (figure 11).

¹¹ <http://www.techspace-aero.be/-composites->

¹² Source : Company websites; Industry literature

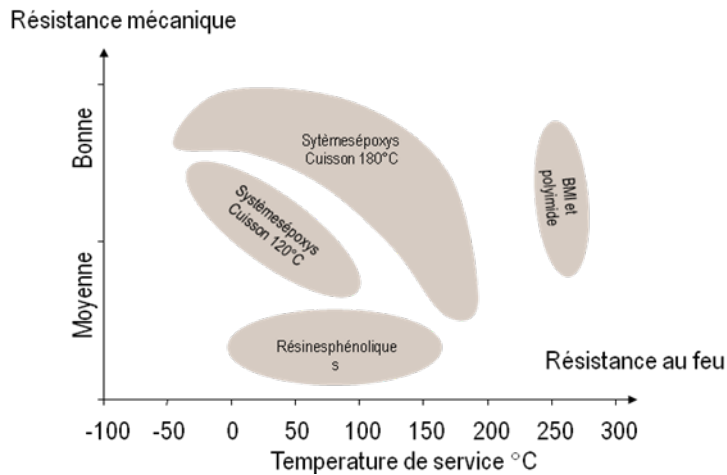


Figure 11 : Types de résines thermodurcissables utilisées en aéronautique¹³

Les résines phénoliques sont plutôt utilisées pour les pièces intérieures de l'avion, les résines époxyds, pour les structures secondaires et de plus en plus, dans les structures primaires, et les résines BMI, là où la résistance en température est critique, dans l'environnement des moteurs.

Les techniques d'enduction (Hand Layup) ne peuvent être utilisées pour de grandes pièces de structure, elles sont de plus en plus remplacées par des procédés automatisés de placement de prepregs (ATL Automated Tape Layup) ou de placement de fibres (AFP Automated Fibre Placement) (Fig. 12) .

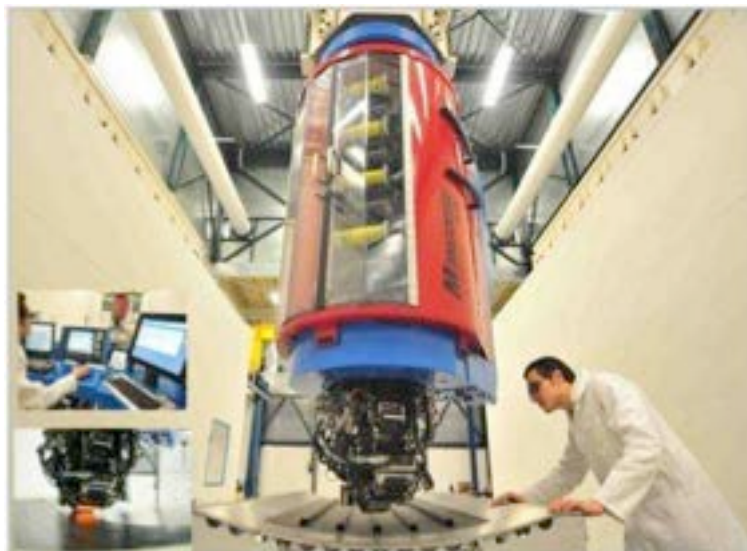


Figure 12 : Automated Fibre Placement (AFP) (doc. Sonaca)

Les techniques en autoclave (fig.13) qui sont une variante améliorée de la technique d'infusion (bag-moulding), permettent d'obtenir des pièces avec un minimum de défauts (voigts), sont largement utilisées.

¹³ Source : Hexcel, press reports, expert interviews



Figure 13 :Autoclaves utilisées pour les pièces aéronautiques (doc. Sonaca)

Les techniques d'injection sous pression, comme le RTM (Resin Transfer Molding) (Fig.14) et, plus récemment, le SQRTM¹⁴(Same Qualified Resin Transfer Molding), sont aussi largement répandues.

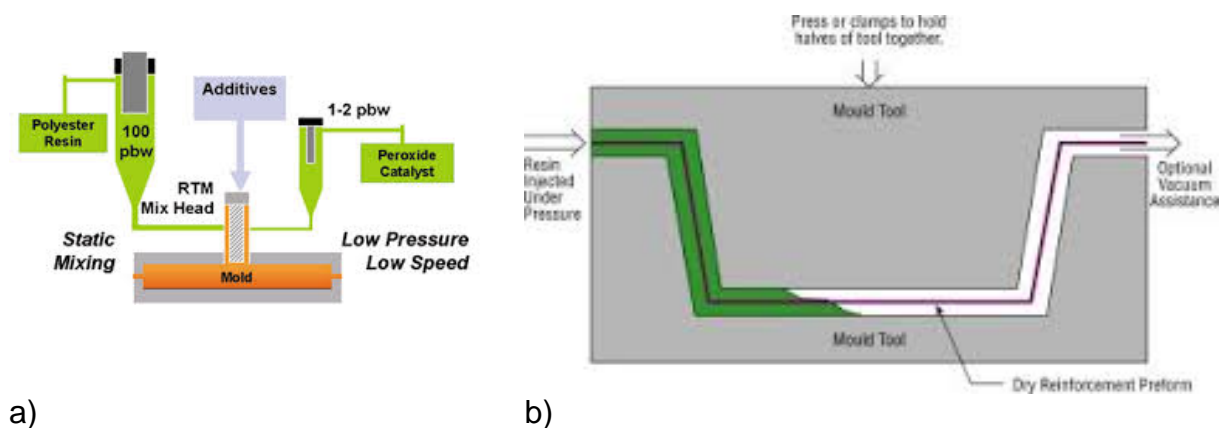


Figure 14 : RTM : a) Schéma d'installation b) principe

Le SQRTM est une technique récente, dérivée du RTM mais qui permet, en utilisant pour la mise en pression, de la résine identique à celle utilisée pour les preregs, d'éviter une étape supplémentaire de qualification. Cette qualification est une procédure détaillée (donc longue) qui est destinée au contrôle des propriétés des matériaux et des procédés mis en œuvre pour les structures primaires et secondaires des avions¹⁵.

¹⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Out_of_autoclave_composite_manufacturing

¹⁵: Report available at the Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center's Full-Text Technical Reports : http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ang/offices/tc/library/

Perspectives

Le secteur des matériaux composites pour l'aéronautique reste en plein développement, notamment avec l'introduction de nanocomposites, de matériaux hybrides, aérogels, etc.¹⁶

Copyright of +Composites consortium partners

¹⁶ Meador, M., A., NASA, Polymeric Materials for Aerospace Power and Propulsion- NASA Glenn Overview