

# Les nouveaux matériaux composites pour l'aéronautique

*Vincent Aerts est ingénieur chimiste de l'université de Liège et docteur en science des matériaux composites de l'université de Sheffield. Il est ingénieur de recherche à la société Solvay<sup>1</sup> en tant que responsable de recherches « matériaux composites ».*

Si l'industrie aéronautique a besoin d'un fort degré d'innovation, parce l'utilisation de ses appareils ne cesse d'évoluer, elle peut néanmoins paraître très conservatrice par beaucoup d'aspects. Adopter de nouvelles technologies ou de nouveaux polymères, pour fabriquer de nouveaux matériaux composites, réclame en effet d'énormes efforts en matière de conception, de développement, de tests et de vérifications. Le choix des nouveaux matériaux appelés par les nouvelles utilisations doit tenir compte, à chaque phase, de ces besoins et chercher à en diminuer les difficultés.

## 1 Qu'est-ce qu'un matériau composite ?

Comme son nom l'indique, un matériau composite est composé de plusieurs éléments (**Figure 1**), dont le premier, qui est essentiel, est la fibre de renforcement. Typiquement, il s'agit du carbone ou du verre. Une fibre de carbone fait cinq à sept microns d'épaisseur, et on utilise des milliers de fibres pour fabriquer des matériaux composites. Le deuxième élément est la matrice organique, dont le rôle est de maintenir toutes ces fibres ensemble, comme une colle, et de les protéger en transférant toutes les contraintes de fibres en fibres.

1. <https://solvay.fr>



Figure 1

Les domaines d'utilisation des matériaux composites dans l'aéronautique.

Les avantages des matériaux composites sur les matériaux métalliques sont : leur grande rigidité et leur forte spécificité qui permettent de réaliser des structures plus légères et plus efficaces, une grande flexibilité dans le design (Figure 2), et la résistance à la fatigue. On pense *a priori* que remplacer

une structure métallique par une structure composite permet de gagner du poids. Ce n'est pas toujours vrai. Par exemple pour certains hélicoptères, leur avantage vient de leur tenue en fatigue, ce dont souffrent beaucoup les hélicoptères. D'autres avantages des matériaux composites sont la résistance à la corrosion, ainsi que la possibilité de réaliser des structures plus intégrées (Figure 3).

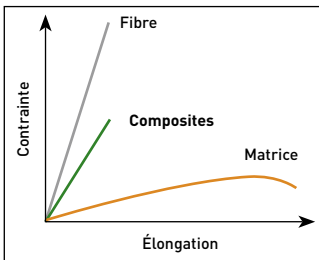


Figure 2

Un matériau composite est l'assemblage de fibres de renforcement et d'une matrice souvent organique. Cela permet au matériau d'avoir des propriétés intéressantes comme une bonne résistance aux contraintes.



Figure 3

Exemples de fibres de renforcements de matériaux, utilisées par milliers pour former des composites.

## 2 Comment choisir les matériaux composites pour l'aéronautique ?

### 2.1. La matrice

La chimie de la matrice est sélectionnée pour répondre aux multiples impératifs liés à l'utilisation du matériau. Le choix fondamental se fait entre une matrice

thermodurcissable<sup>2</sup> ou une matrice thermoplastique<sup>3</sup> (Figure 4). Un thermodurcissable est un polymère fabriqué à partir de petites molécules – les monomères<sup>4</sup> –, qui constituent un milieu liquide. Pendant la cuisson du matériau composite, ces molécules réagissent pour former un réseau en trois dimensions qui durcira à la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) et donnera la structure finale du matériau composite. Un thermoplastique est un produit fabriqué à partir de chaînes

moléculaires déjà polymérisées solides à température ambiante. On doit fondre ces résines pour les mettre en forme ; au refroidissement, le produit conserve la forme qui lui a été donnée.

### 2.2. La température de service

Un facteur de choix est celui de la température « de service », c'est-à-dire celle à laquelle le matériau doit être utilisé (Figure 5). Près d'un réacteur, les températures sont plus élevées que sur une aile. Pour un avion civil, ce ne sont pas les mêmes températures que pour un avion de chasse militaire supersonique où le frottement de l'air sur l'aile fait chauffer celle-ci à des températures jusqu'à 100-120 °C.

### 2.3. La résistance à l'environnement

Un autre critère est la résistance à l'environnement. Si un avion est parké sur un runway (une piste) en

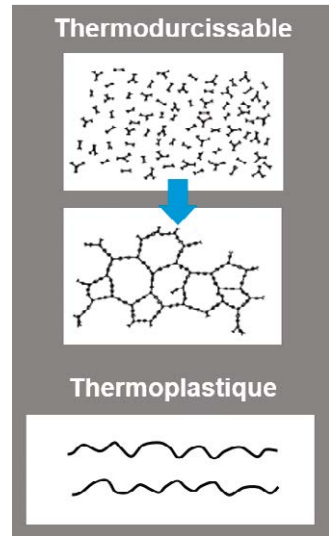


Figure 4

On différencie les thermoplastiques des thermodurcissables. Les thermoplastiques peuvent être fondus et mis en forme à volonté alors que les thermodurcissables ne peuvent plus être fondus après leur refroidissement.

2. Thermodurcissable : qualifie un matériau qui durcit de façon irréversible au-dessus d'une certaine température.
3. Thermoplastique : qualifie un matériau qui se ramollit d'une façon répétée lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais qui, au-dessous, redevient dure. Une telle matière conservera donc toujours de manière réversible sa thermoplasticité initiale.
4. Monomère : molécule qui, par enchaînements successifs avec des molécules identiques ou différentes, donne naissance à une structure polymère.

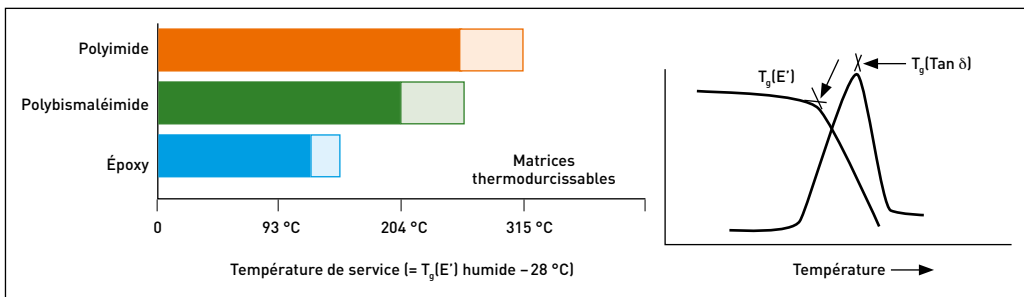


Figure 5

<sup>1</sup> Les matrices thermodurcissables peuvent avoir des températures de transition vitreuse  $T_g$  différentes et donc des températures de service différentes. Ces matrices ont donc toutes des applications distinctes dans l'aéronautique, en fonction de la température de service en question.  
Époxy = polyépoxyde (issu de la polymérisation de monomères époxyde).

Malaisie par exemple, à Kuala Lumpur où règne un climat chaud et humide, il sera soumis à une humidité qui diffusera dans les polymères et en réduira les performances : avoir une bonne résistance à l'humidité est donc indispensable.

En hiver c'est la résistance du polymère à l'antigel qui apparaît comme importante. On peut aussi citer la résistance au « jet fuel » (carburant) et même aux solvants à peinture ; quand un avion est vendu d'une compagnie à une autre, il faut enlever la peinture pour que la nouvelle compagnie puisse mettre son logo et repeindre avec ses couleurs. On doit donc utiliser des solvants très agressifs et il faut que les matrices polymères résistent. Tous ces critères sont importants.

#### 2.4. La conduction électrique et la résistance au feu

D'autres critères concernent la conduction électrique pour assurer une résistance à la foudre (qui intervient en moyenne une fois par an et est susceptible de gravement endommager l'appareil), ainsi que la résistance au feu, surtout importante pour le fuselage, et qui permet que tous les passagers aient le temps d'évacuer l'avion en cas d'atterrissage difficile.

Bien entendu, le coût du produit fini reste inéluctablement un critère de choix, même pour les avions militaires. Toutes ces propriétés dépendent au premier degré du choix de la matrice, thermodurcissable ou thermoplastique.

### 3 La chimie des matériaux composites pour l'aviation

Pour les structures primaires des avions, les matrices ressortissent à trois types de chimie (voir la *Figure 5*). Ce sont les résines époxy<sup>5</sup>, qui ont des températures de service jusqu'à environ 120 °C, les résines bismaléimides, qui peuvent aller jusqu'à 200 °C-230 °C, puis les polyimides<sup>6</sup>, qui vont jusqu'à des températures de 300 °C et sont plus utilisées près des réacteurs dans les avions de combat.

Un mot ici sur la flexibilité au design des composites. On en saisit l'importance en comparant diverses pièces de l'avion (*Figure 6*). Par exemple, un stabilisateur vertical est chargé en torsion. Une aile d'avion en vol, quand l'aile se plie, au-dessus on est en compression alors qu'en dessous on est en tension, donc on n'a pas toujours les mêmes besoins au point de vue design. Pour le bord d'attaque d'une aile ce sera la résistance à l'impact à haute vitesse qui sera déterminante. Sur le dessus du fuselage, la résistance à l'impact des grêlons est très importante et il en est de même pour le

5. Résine époxy : composé chimique au pouvoir adhérent et thermodurcissable qui peut être utilisé comme colle ou combiné à d'autres substances pour former une matière plastique comme la résine époxy.

6. Polyimides : polymères colorés (souvent ambrés) qui comportent des groupes imide (O=CNR-C=O) dans leur chaîne principale. Les polyimides sont surtout connus pour leur thermostabilité.

dessus d'une aile. La technologie des composites permet d'adapter le design au besoin de l'application avec beaucoup de souplesse.

Voici quelques exemples de choix de matériaux.

Pour le nouveau bombardier, l'aile est en composite, la fibre est une fibre de carbone et la résine est une résine époxy. La technique de fabrication met en jeu une infusion de résine : toutes les fibres de renforcement sont sèches, mises en forme, puis la résine est infusée dans le renforcement. Le choix de la matrice polymère doit à la fois assurer de bonnes performances pour l'aile terminée après la cuisson mais aussi préserver une réactivité bien ajustée, ni trop élevée pour permettre d'infuser l'aile, ce qui peut prendre plusieurs heures, mais en avoir suffisamment pour que les réactions se fassent de manière efficace. Le chimiste

joue donc le rôle essentiel de concevoir la composition chimique de cette matrice polymère.

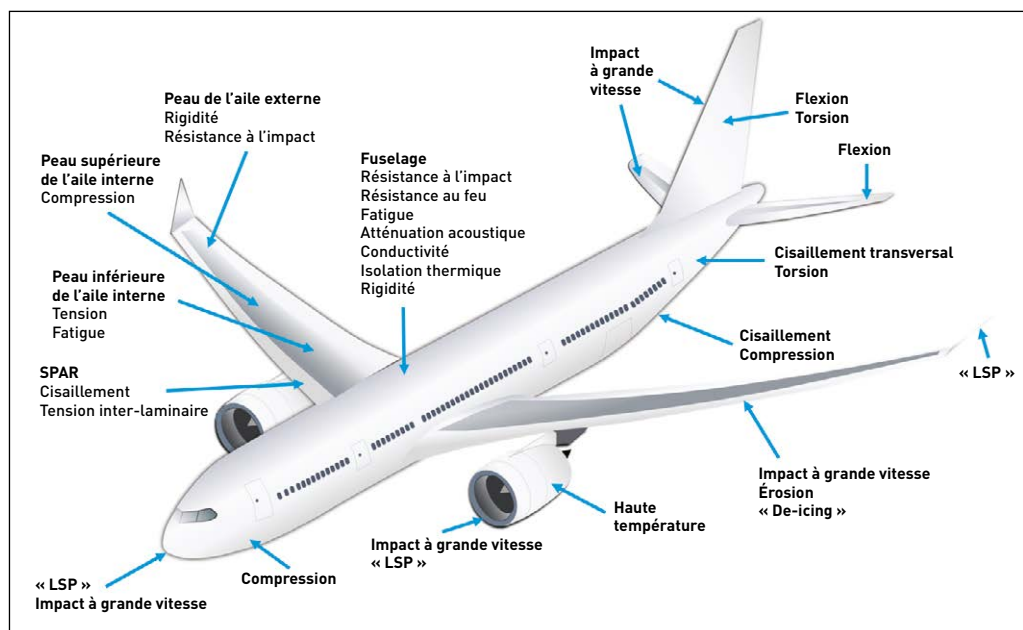
Pour l'équipement intérieur de l'avion aussi, se pose le problème du choix des matériaux. Par exemple pour les boîtes de rangement des bagages dans l'avion, on doit garantir la résistance à la propagation du feu ainsi qu'à la toxicité des fumées. Il y a aussi une exigence forte de résistance mécanique compte tenu de l'utilisation faite par les passagers. Il faut aussi tenir compte du coût. Ces critères ont conduit à la sélection des résines phénoliques<sup>7</sup>, la chimie phénolique étant bien maîtrisée.

Dans le cas des pales de rotor d'un hélicoptère, c'est le critère de résistance à la fatigue

7. Résine phénolique : polymère therm durcissable issu du formaldéhyde et du phénol.

Figure 6

Les différentes parties d'un avion subissent des contraintes diverses. Les matériaux composites utilisés doivent donc avoir une flexibilité importante afin de résister aux forces subies.



qui domine le design. Le matériau choisi est une fibre de verre de type S plutôt que de type E<sup>8</sup> avec une résine époxy.

Pour certains avions de combat, le critère de sélection de la chimie est d'une part la résistance à la compression et d'autre part la résistance à une température plus élevée nécessaire quand ils volent en vitesse supersonique. Une des solutions adoptées sont les résines bismaléimides<sup>9</sup>.

Pour les aubes de réacteurs, on utilise les résines

8. Les verres de type S et E se différencient l'un de l'autre par les proportions de leurs composants, notamment en silice (SiO<sub>2</sub>), alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou encore oxyde de calcium CaO.

9. Résine bismaléimide : résine composée de deux fonctions maléimide H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>(CO)<sub>2</sub>NH.

époxy pour avoir des résistances suffisantes à de très grandes vitesses d'impact. Par exemple au décollage, s'il arrive que des oiseaux soient ingérés dans le réacteur, on peut évidemment avoir de la perte d'intégrité de l'équipement.

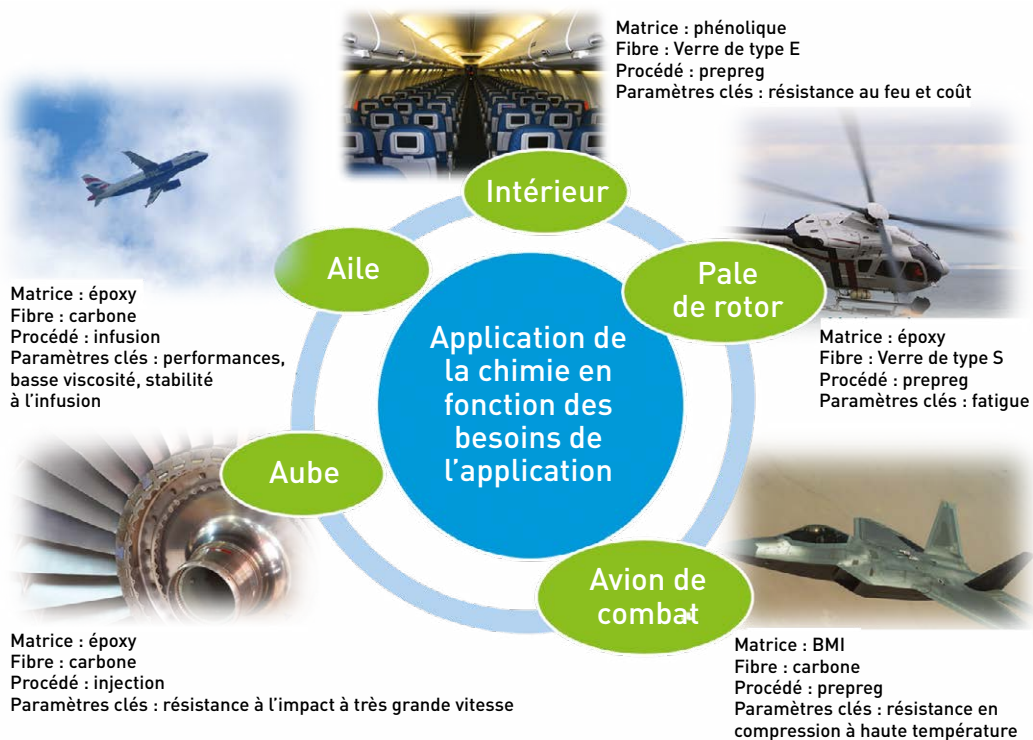
## 4 Les défis du futur

Quels sont les défis du futur ? On en voit de plusieurs catégories.

Pour la recherche : il s'agit de continuer à développer des résines pour augmenter la performance. Les clients veulent toujours plus de performance mais aussi plus d'intégration dans le design et plus de multi-fonctionnalités.

Figure 7

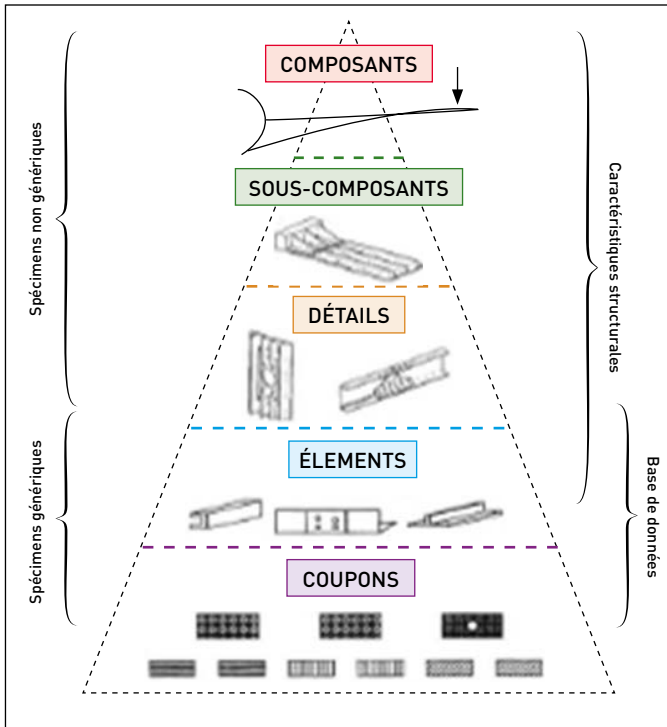
Les matrices, fibres et procédés utilisés dépendent de l'application finale et des performances que doit fournir le matériau.



Pour l'**industrialisation** : l'industrie aéronautique a adopté des cahiers des charges de composites sur la structure, et quand on voit les rythmes de production (peut-être 60 ailes par mois pour certaines industries), c'est vraiment de l'industrie. Cela se rapproche de l'industrie automobile avec des vitesses de production très élevées et les défis associés. Un autre défi pour les composites est le **recyclage**. Comme

on utilise de plus en plus de composites dans l'aéronautique, que faire de ces composites en fin de vie d'un avion ? C'est un gros défi auquel nous faisons face.

Et finalement, la **certification** : cela demande énormément de tests de validation, et pour adopter de nouvelles chimies et de nouveaux matériaux, c'est parfois plus long que ce qu'on ne souhaiterait (**Figure 8**).



**Figure 8**

Pyramide de tests nécessaire pour valider l'adoption d'un nouveau matériau.



## Le développement des composites : pas sans la chimie !

La **Figure 9** résume bien le rôle clé de la chimie dans le développement des matériaux composites. D'un côté nous avons l'aspect virtuel (la simulation par ordinateur), et de l'autre l'aspect expérimental. Ils vont vraiment main dans la main. Quand on développe des nouvelles chimies, on parle vraiment de la structure moléculaire : partir d'une molécule, et si on veut une plus grande réactivité, changer la structure de la molécule ou partir d'une molécule aliphatique<sup>10</sup> vers une molécule aromatique<sup>11</sup> pour avoir plus de rigidité sur le polymère et des températures d'utilisation plus élevées. Il y a beaucoup de design, d'optimisation de molécules. On part des molécules puis on va vers les alliages de polymères, puis l'échelle suivante consiste à tester ces polymères puis les polymères avec les fibres de renforcement. Ensuite, on passe à une plus grande échelle ; point de vue échantillon mécanique, puis « sub elements » (donc des petites pièces d'avion) pour aller jusqu'à la tête de la pyramide.

On trouve des chimistes qui ont commencé comme chimistes et qui ont fini comme ingénieurs en mécanique en réalisant des tests. On trouve des ingénieurs en mécanique qui ont commencé à faire des tests et qui ont pris passion pour la chimie, sont revenus plus bas dans la pyramide et ont travaillé sur la chimie. Cette activité est vraiment multidisciplinaire et il est passionnant de travailler dans ce domaine !

10. Aliphatique : molécule qui présente une chaîne carbonée ouverte.

11. Aromatique : molécule dont les atomes forment des structures cycliques et planes particulièrement stables (comme le benzène, le phénol...).



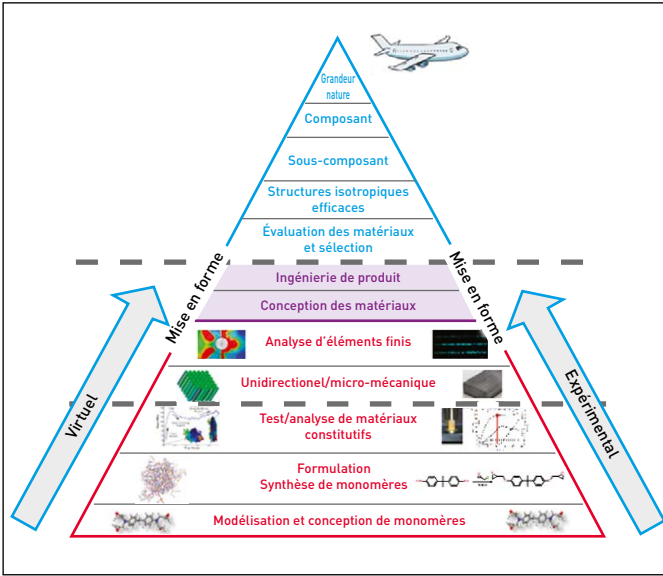


Figure 9

Le développement des matériaux composites pour la construction d'un avion requiert des simulations ainsi que des expérimentations, de l'étude au niveau moléculaire jusqu'aux études mécaniques afin de former, en haut de la pyramide, un avion.