

# Les défis matériaux et procédés pour les équipements aéronautiques

Olivier Delcourt est directeur du pôle Matériaux et Procédés de Safran Tech (Encart : « Safran, un équipementier aéronautique »).

## SAFRAN, UN ÉQUIPEMENTIER AÉRONAUTIQUE

### La compagnie Safran

Safran\* compte aujourd'hui 70 000 personnes réparties dans plus de 50 pays. Safran développe et produit une grande variété d'équipements pour les avions, comme les moteurs, mais également des équipements électriques, des trains d'atterrissages, des systèmes de distribution de puissance, des nacelles\*\*. L'organisation est schématisée sur la **Figure 1**.

\* Le nom des sociétés Safran a changé récemment. Ainsi, on ne parle plus de Snecma mais de Safran Aircraft Engines, de Safran Electronics & Defense, etc. La terminologie est plus lisible, à la fois en France et à l'international.

\*\* Nacelle : ensemble support et capots d'un moteur d'un avion multimoteurs.

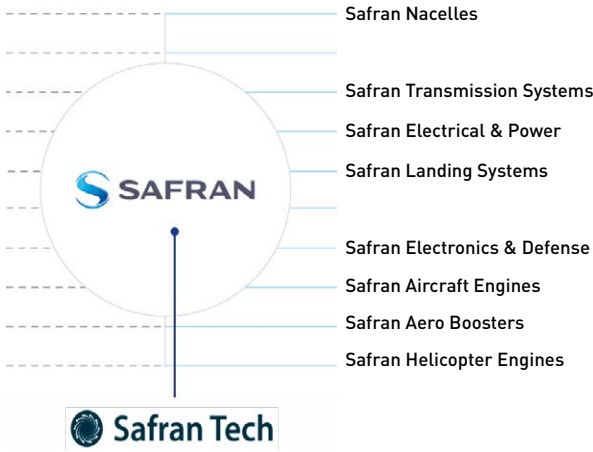


Figure 1

Organisation des différentes entités du groupe Safran.

**Safran Tech, centre névralgique de l'innovation chez Safran**

Safran Tech est le centre de recherche de Safran inauguré en janvier 2015 (Figure 2). Il a pour vocation de travailler sur de la recherche amont mutualisée pour l'ensemble des sociétés du groupe. Il est basé sur le campus de Paris-Saclay auprès de nombreux partenaires académiques et industriels (Figure 3).



Figure 2

Inauguration de Safran Tech.



Figure 3

Localisation de Safran Tech en France.

## 1 Les grands enjeux d'un équipementier aéronautique

La **Figure 4** représente les principaux enjeux pour les « équipementiers aéronautique » comme Safran :

- premier enjeu : en ce qui concerne les motorisations, c'est la **performance**. Il faut moins consommer, améliorer les rendements, moins polluer. La conséquence est une augmentation des températures et des vitesses de rotation des moteurs. Par ailleurs ces moteurs devront rester suffisamment compacts pour être intégrables dans une structure d'avion ... autant de défis pour les matériaux ;
- deuxième enjeu : la **maintenance/réparation**. Les nouveaux « business models » (ou modèles économiques d'activité ; **Encart : « Un nouveau "business model" »**) rendent ces objectifs extrêmement importants. Les compagnies aériennes exigent de plus en plus de contrats à l'heure de vol. La notion de durabilité prend donc tout son sens...
- troisième enjeu : provient de la **réglementation** pour

les matériaux et en particulier de la Directive REACH<sup>1</sup> interdisant l'utilisation de chrome (VI) dans nos fournitures. Cela pose des difficultés, notamment sur les traitements de surface par voie humide<sup>2</sup>. On doit trouver des solutions de substitution, ce qui implique une forte activité de recherche et de développement ;

- une dernière préoccupation, commune à beaucoup d'industries, est la maîtrise du **coût global** des productions. On cherche évidemment d'abord la fiabilité et la protection du client, mais en même temps on doit proposer des solutions technico-économiquement viables.

1. Directive REACH : règlement du Parlement européen et du Conseil de l'Union Européenne qui met en place un système intégré unique d'enregistrement, d'évaluation et d'autorisation des substances chimiques dans l'Union Européenne depuis 2007.

2. Voie humide : qualifie l'ensemble des procédés de fabrication de pièces composites dans lesquels la résine est déposée sous forme liquide sur les renforts pendant le cycle de fabrication.



Figure 4

Les enjeux de Safran.

### UN NOUVEAU « BUSINESS MODEL »

Dans l'ancien business model, des révisions périodiques sont réalisées avec, selon les cas, des réparations ou des changements de pièces facturées à la compagnie aérienne.

Aujourd'hui sont appliquées de plus en plus de formules de type « leasing\* » : on fournit le moteur à bas coût à la compagnie aérienne, mais ensuite on facture de l'heure de vol. Cela concerne par exemple aujourd'hui le nouveau LEAP (« *Leading Edge Aviation Propulsion* »), pour lequel on vend « de l'heure de vol ».

Dans ce modèle, moins on répare, meilleures seront les marges. La question de la durabilité est donc majeure sans bien évidemment compromettre la sécurité des vols. La compagnie aérienne, elle, ira évidemment vers le moteur le plus durable, celui qui ne demande (presque) pas de réparation.

\* Leasing : terme anglophone pouvant être traduit par « crédit-bail ». Il s'agit d'un système de location-vente par lequel un client loue un bien. Il a cependant une option d'achat à l'échéance de la période convenue.

## 2 Des contraintes à surmonter pour les produits de l'aéronautique

### 2.1. Des contraintes naturelles

Pour l'utilisateur, l'image de l'avion, c'est le départ en vacances sous le Soleil... (Figure 5).

Dans la réalité, la vraie vie d'un avion, ce n'est en fait pas cela. Il doit pouvoir surmonter des contraintes très sévères liées à l'environnement : l'eau (Figure 6A), le sable qui rentre dans les moteurs (Figure 6B), la neige (Figure 6C), la glace, les volatiles (Figure 6D), etc., qui impliquent beaucoup de souffrance aux éléments mécaniques.

Figure 5

A) Airbus A340-300 emmenant des vacanciers ; B) hélicoptère arrivant vers les cocotiers.





Figure 6

Les contraintes fonctionnelles : A) l'eau ; B) le sable ; C) la neige et la glace ; D) les volatiles.

2.2. De fortes exigences mécaniques

Pour une voiture, les vidanges et les entretiens s'effectuent tous les 20 000, 30 000 kilomètres, c'est-à-dire peut-être tous les 500 à 1 000 heures. Mais un moteur d'avion doit tenir sans révision plutôt 20 000 heures, avec des distances parcourues bien supérieures. La Figure 7 compare les niveaux d'exigences mécaniques de différents types de

moyens de transports : la conclusion est évidente !

Concernant la **puissance des moteurs**, on a aussi une différence spectaculaire entre les équipements aéronautiques et les voitures (Figure 8) : 100 kW d'un côté pour une voiture usuelle, 700 KW pour une formule 1, et cent fois plus pour un avion long courrier<sup>3</sup> !

3. Long courrier : avion de transport destiné à voler sur de très longues distances (6 000 km au moins).

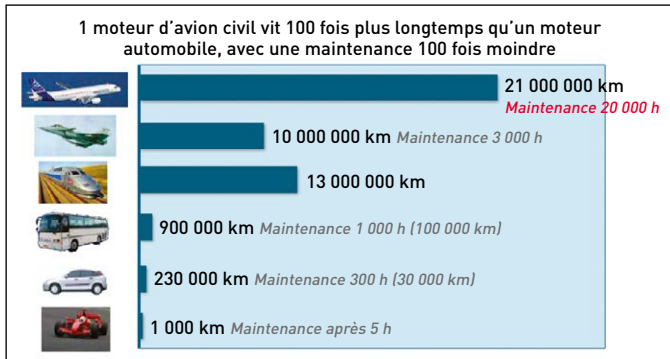
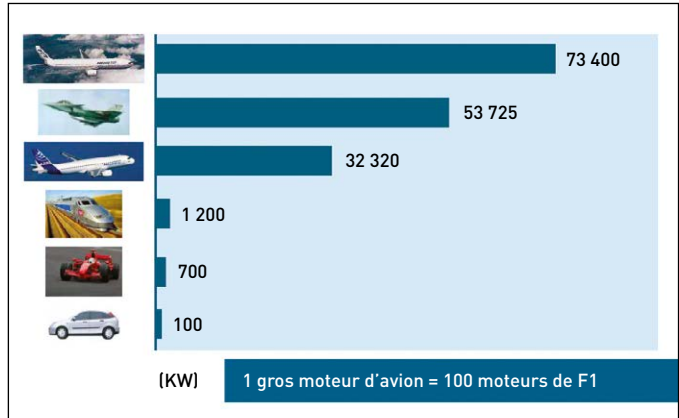


Figure 7

Ordres de grandeur des distances parcourues entre deux maintenances pour différents types de moteurs.

Figure 8

Ordres de grandeur des puissances de différents types de moteurs.



Le Rafale<sup>4</sup> est également très puissant avec ses deux moteurs.

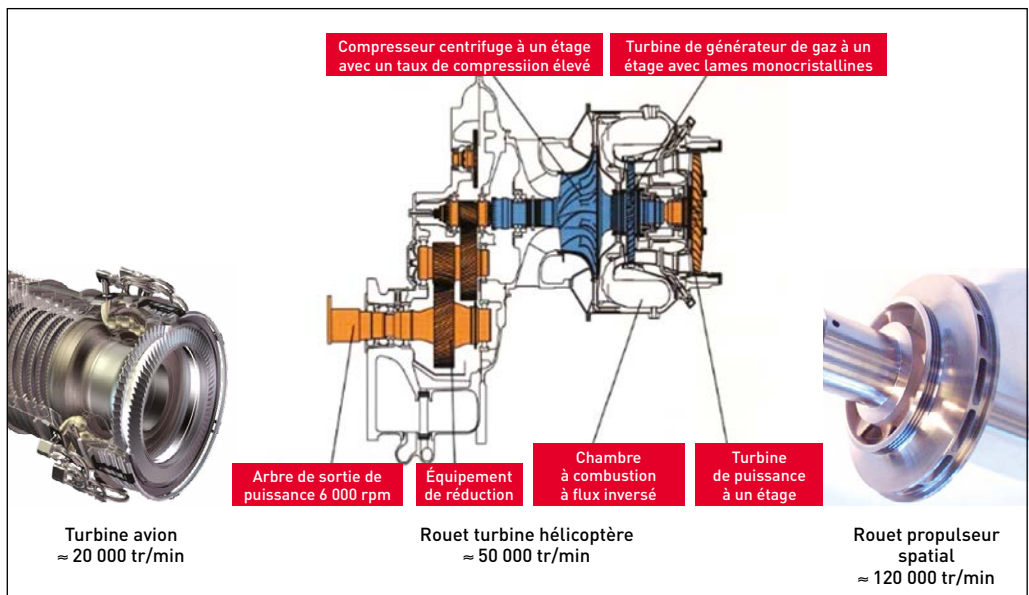
Les **conditions de fonctionnement des moteurs** par ailleurs sont extrêmement exigeantes en ce qui concerne leur vitesse de rotation et leur température de fonctionnement.

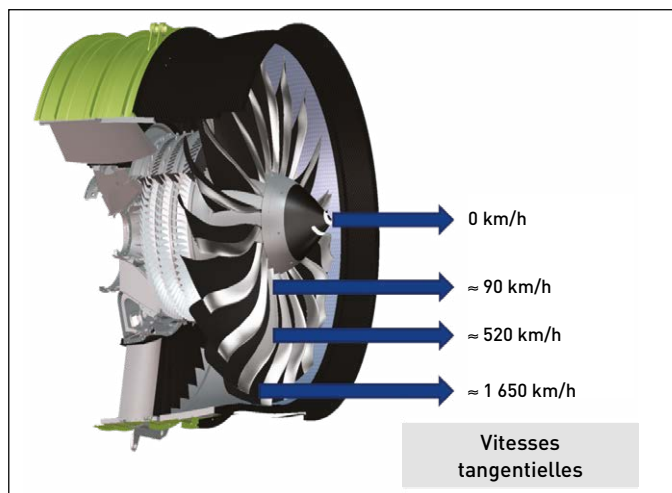
La **Figure 9** donne quelques ordres de grandeur de ce qui se passe dans un moteur. Une turbine d'avion tourne à environ 15 000 tr/min, un rouet de moteur d'hélicoptère à 50 000 tr/min, et un rouet de propulseur spatial à 120 000 tr/min. Cette dernière pièce sera d'ailleurs testée à 200 000 tr/min pour s'assurer qu'elle ne va pas casser quand on va lancer le propulseur Ariane 5 par exemple !

Figure 9

Ordres de grandeur des vitesses de rotation de différents types de moteurs.

4. Rafale : avion de combat omni-rôle développé pour la Marine nationale et l'Armée de l'air française par Dassault Aviation.





En regardant les **vitesses tangentielles des aubes**<sup>5</sup> dites FAN<sup>6</sup> (Figure 10), on voit qu'elles peuvent atteindre des vitesses supérieures à la vitesse du son – avec la contrainte de résistance mécanique extrême que cela entraîne sur les matériaux.

Le **cœur du moteur** donne probablement l'exemple des plus grosses contraintes appliquées aux matériaux. Le principe implique qu'on admette un maximum d'air dans le moteur, qu'on le comprime, qu'on l'envoie dans une chambre de combustion où explose le mélange carburant-oxygène. Après cette étape, le gaz vient, se détend dans la turbine basse pression située à l'arrière du moteur. Tout cela se traduit par des températures très élevées (Figure 11), qui, dans

certains cas, peuvent même dépasser la température de fusion du matériau. On assure la tenue du système grâce à un refroidissement intérieur par des gaz plus froids (mais à 800 °C tout de même) permettant de baisser suffisamment la température de peau.

Sur les **aubes**, les exigences sont multiples (Figure 12) ; il faut gérer les compromis entre la tenue en fatigue – due aux sollicitations répétées qu'on demande à l'aube au fur et à mesure des rotations –, le risque de fluage<sup>7</sup> – c'est-à-dire l'écoulement visqueux du matériau par la centrifugation<sup>8</sup> s'il ne résiste pas assez –, et les problèmes d'usure de contact (le « fretting »), qui peuvent venir des petits déplacements au niveau

7. Fluage : phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée d'un matériau soumis à une contrainte constante.

8. Centrifugation : procédé de séparation des composés d'un mélange en fonction de leur différence de densité en les soumettant à une force centrifuge.

Figure 10

Ordres de grandeur des vitesses tangentielles exercées sur les différentes aubes d'une turbine d'avion.

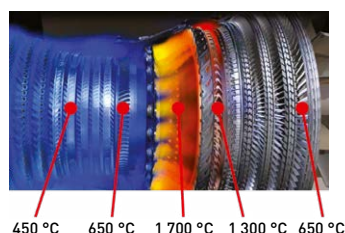


Figure 11

Ordres de grandeur des températures au sein d'un moteur.

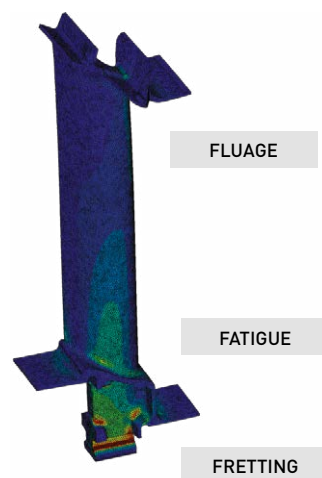


Figure 12

Les trois thématiques de contraintes auxquelles les matériaux doivent répondre.

5. Aube : partie d'une turbine en forme de cuillère ou de pale sur laquelle s'exerce l'action du fluide moteur.

6. Aube FAN : aube ayant pour rôle d'assurer la compression initiale de l'air entrant dans le réacteur.



Figure 13

Les trains d'atterrissage présentent des contraintes insoupçonnées.

### LES CONTRAINTES QUE SUBIT LE TRAIN D'ATTERRISSAGE LISTE NON EXHAUSTIVE

#### Un environnement agressif

- Atmosphère (humidité, agents corrosifs)
- Fluides de dégivrage et déverglçage
- Fluides hydrauliques
- Projections (ex : gravillons)

#### Des sollicitations sères

- Contraintes statiques
- Fatigue
- Friction, fretting
- Température (proximité des freins)

du pied d'aube, susceptibles de dégrader le matériau.

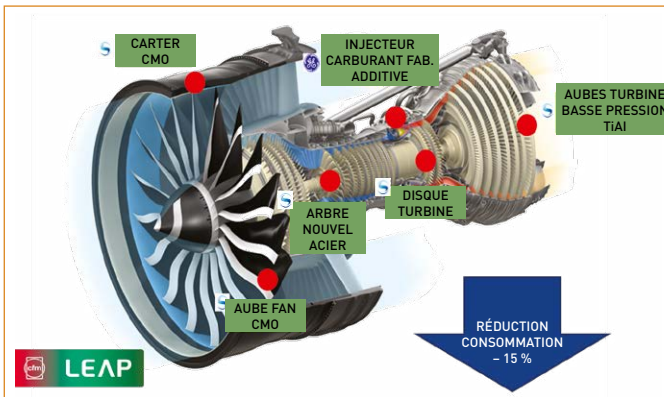
Les solutions matériaux retenues doivent répondre à ces trois difficultés. Les recherches de solutions sont complexes et imposent de travailler sur le matériau, son traitement et son revêtement.

Les **trains d'atterrissage** (Figure 13 et Encart : « Les contraintes que subit le train d'atterrissage ») sont également des composants très sollicités puisqu'ils voient souvent des conditions d'environnements très agressifs.

Au décollage, par exemple, ils embarquent de l'eau, du sel, qui, une fois dans la carlingue, « macèrent » sans possibilité de sécher. Cet environnement accélère fortement la corrosion. N'oublions pas non plus toutes les manœuvres de parking qui sollicitent très durement, en fatigue, les matériaux et les pièces. C'est probablement ce qui constitue le premier facteur limitant dans le dimensionnement des trains d'atterrissage, même davantage que les sollicitations à l'atterrissage proprement dit.

Figure 14

Les innovations matériaux appliquées au moteur LEAP.



## 3 Les produits actuels : des solutions innovantes pour répondre aux contraintes

### 3.1. Le moteur LEAP : une nouvelle génération de moteur utilisant de nouveaux matériaux

Le moteur LEAP (Figure 14) est une nouvelle famille qui équipe tous les petits-moyens courriers tournant sur la planète. Ce sont des moteurs à



très forte diffusion qui vont équiper Airbus, Boeing et bientôt Comac en Chine. Ils remplacent la gamme des moteurs CFM56 réalisés en partenariat avec GE.

Ces moteurs intègrent une série de solutions nouvelles en matière de matériaux dont voici quelques exemples. D'abord, ils intègrent une forte proportion de composites à matrice organique<sup>9</sup> : plus précisément ce sont des fibres de carbone noyées dans une matrice<sup>10</sup> de résine thermodurcissable<sup>11</sup>. On a, par ailleurs, travaillé sur un nouvel acier pour les arbres de turbine, et des nouveaux matériaux base nickel pour les disques de turbine. General

Electrica appliqué la fabrication additive pour les injecteurs<sup>12</sup> (voir plus loin). Sur le dernier étage de la turbine, Safran applique pour la première fois des aubes en **Ti-Al**, un matériau très léger composé à 50/50 de titane et d'aluminium.

### 3.2. Les composites « matrice organique » : l'exemple des aubes FAN

Revenons aux aubes FAN composites, qui constituent une innovation fortement portée par Safran puisque les anciennes générations de moteurs utilisaient des pales en titane monobloc. Ces aubes appartiennent aux générations de composites à matrice organique. Le bord d'attaque<sup>13</sup> rapporté reste quant à lui métallique (*Figure 15*). Cette

9. Matrice organique : résine polymère qui assure la cohésion du matériau composite.

10. Matrice céramique : céramique qui assure la cohésion du matériau composite.

11. Thermodurcissable : se dit d'un polymère dont les macromolécules s'unissent, sous l'action de la chaleur, par liaison chimique.

12. Injecteur : pièce permettant l'apport du carburant dans la chambre de combustion du moteur.

13. Bord d'attaque : section avant d'un profil aérodynamique qui protège le composite des chocs.

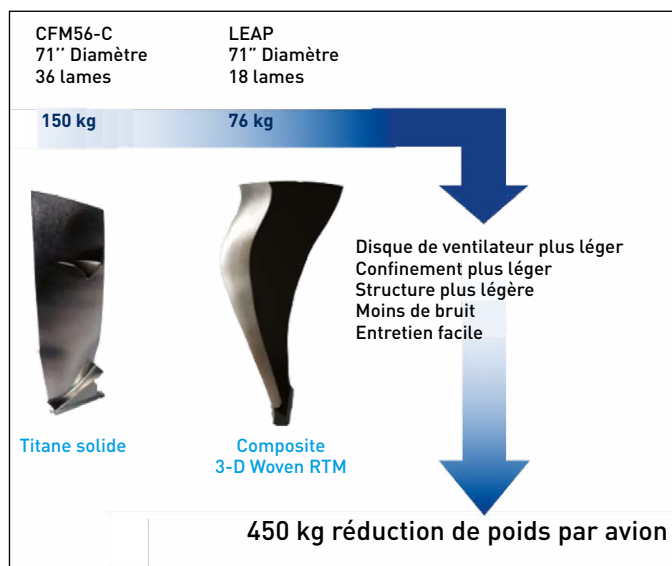


Figure 15

Comparaison des aubes utilisées sur les moteurs CFM56 et les moteurs LEAP.

technologie permet de réduire le nombre d'aubes par rapport aux versions de référence parce que le composite permet un design favorable. Par ailleurs, la masse de la pièce est fortement réduite : on gagne environ 4 kg par aube FAN. Ce gain va même beaucoup plus loin, puisque le fait d'avoir des matériaux allégés dans une zone qui tourne à très haute vitesse permet d'alléger toute la partie centrale du moteur. Finalement, ce changement de technologie de matériau permet de gagner plus de 400 kg !

Le succès de cette technique de fabrication des aubes vient de la maîtrise du tissage 3D de la fibre carbone (Figure 16). Le procédé employé est analogue à celui du tissu Jacquard : il ne s'agit pas de nappes simplement empilées, mais un troisième fil passe à travers la structure et renforce considérablement le matériau. On sait

produire cela désormais en série avec de gros métiers à tisser – dans plusieurs usines à Commercy, aux États-Unis, et bientôt au Mexique. Une fois la structure faite, on vient ajouter la résine, polymériser et rapporter le bord d'attaque.

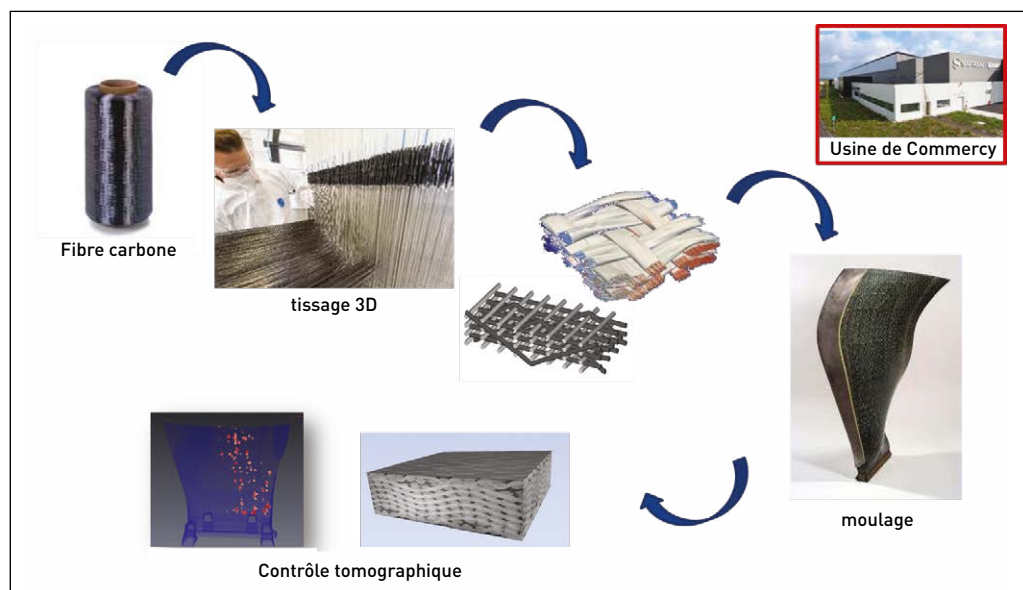
Pour la vérification et le contrôle de la fabrication, une méthode tomographique (un scanner 3D des matériaux) a été mise au point avec un contrôle unitaire.

Cette même technologie de tissage de matrice organique a aussi permis, sur ce moteur, de remplacer le carter<sup>14</sup> (Figure 17) qui entoure le moteur. Les gains de masse sont également très importants par rapport à la solution métallique remplacée.

14. Carter : enveloppe protégeant un organe mécanique, souvent fermée de façon étanche, et contenant le lubrifiant nécessaire à son fonctionnement ou des organes qui doivent être isolés de l'extérieur.

Figure 16

Les étapes de la production d'une aube FAN en composite matrice organique.



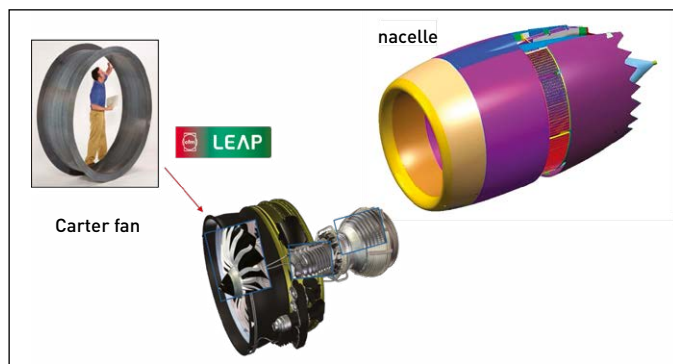


Figure 17

Illustration du carter d'un moteur LEAP.

### 3.3. La fabrication additive : une nouvelle façon de produire les pièces

L'avènement des imprimantes 3D apporte à l'heure actuelle une révolution dans les procédés de fabrication des matériaux : c'est ce qu'on appelle la fabrication additive. Elle a été appliquée sur le moteur LEAP. La technologie utilisée est dénommée « procédé en lit de poudre ». On crée un lit de poudre, on vient fusionner la première couche de la pièce, on remet un lit de poudre et on recommence. On construit ainsi la pièce avec peu de limites géométriques. La **Figure 18** représente un injecteur fabriqué pour le moteur LEAP. On a également des injecteurs qui fonctionnent sur des moteurs d'hélicoptères du groupe (**Figure 19**).

Cette technologie a fait l'objet d'un développement en

plusieurs étapes (**Figure 20**). La première étape a consisté à réaliser une pièce existante en fabrication additive. La deuxième étape a été de reprendre des pièces existantes et d'y intégrer des fonctions. Cela a été effectué pour une pièce du moteur Ariane 5, originellement en trois parties mais qui, en fabrication additive, n'en fait plus qu'une. L'étape ultime, dans laquelle on se trouve maintenant, consiste à concevoir et fabriquer la pièce en fabrication additive. Cela permet d'optimiser les géométries, réaliser des rainures, des cavités ou autre particularités complexes. Il s'agit là d'un vrai saut technique sur la conception et la réalisation des matériaux associés. Cela demande qu'on acquière des compétences en métallurgie des poudres et sur la maîtrise



Figure 18

Illustration d'un injecteur carburant d'un moteur LEAP.



Figure 19

Illustration d'un injecteur carburant d'un moteur d'hélicoptère.

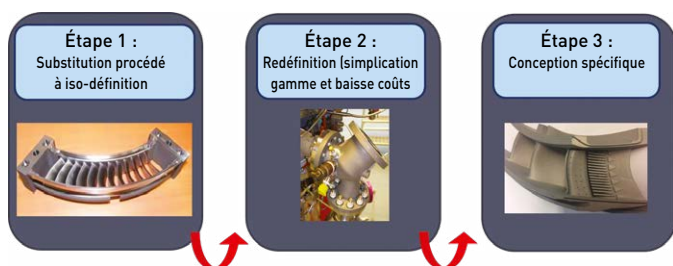


Figure 20

Les étapes de la démarche du développement de la production de pièces par fabrication additive.

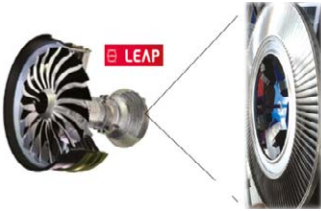


Figure 21

Utilisation d'un alliage à base de Ti-Al pour le dernier étage d'une turbine basse pression du moteur LEAP.

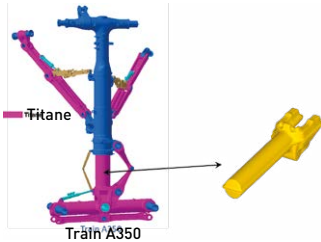


Figure 22

Illustration d'un piston d'amortisseur du train d'atterrissage A350.



Figure 23

Une presse de 65 000 tonnes.

de la filière d'élaboration correspondante.

### 3.4. Le titane : une utilisation de plus en plus importante dans les alliages

Le Ti-Al, utilisé sur le dernier étage du moteur LEAP (Figure 21), est un matériau mixte Titane-Aluminium ; au-delà de 600 °C, le ratio caractéristique mécanique/densité devient meilleur que celui des alliages base nickel. Un alliage base nickel a une densité de 8,9, alors que le Ti-Al est à 4,2. Il a été industrialisé pour la première fois sur le dernier étage d'une turbine du moteur LEAP. Le Ti-Al est un super matériau mais il s'usine mal, il se coule mal, ne se forge quasiment pas... il y a encore du travail d'optimisation !

Pour les nouvelles fabrications de trains d'atterrissage, on remplace certaines pièces de tailles importantes en acier par du titane. La Figure 22

représente un piston d'amortisseur du train. C'est une pièce qui pèse 1 200 t à l'état brut, et qui est forgée sur des presses impressionnantes, de 65 000 t (Figure 23). Le titane (densité 5) apporte un gros avantage de poids par apport à l'acier (densité 7,8), soit une économie de 7 % du poids. Un autre gros intérêt du titane est sa moindre susceptibilité à la corrosion, ce qui permet une extension des intervalles de révisions.

## 4 Quelles pistes d'innovation dans les matériaux aéronautiques ?

### 4.1. Des matériaux complémentaires : une saine compétition

Outre les développements en cours, il y en a d'autres plus futuristes induisant d'autres ruptures technologiques en matière de matériaux et de procédés. La Figure 24

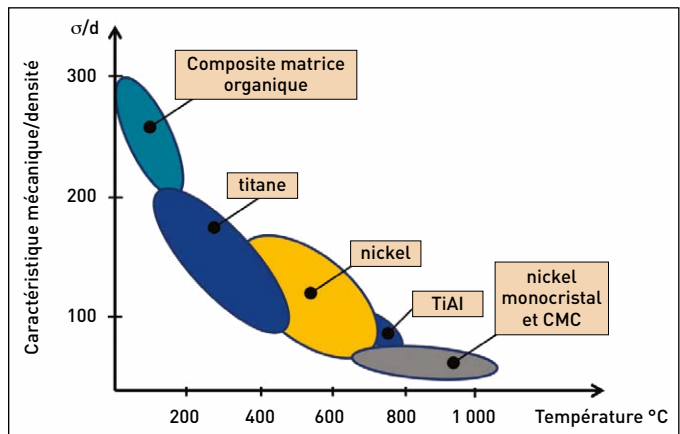


Figure 24

Diagramme rapport caractéristique mécanique/densité en fonction de la température de différents matériaux.

résume le positionnement des matériaux. Il montre le niveau de résistance ramené à la densité en fonction de la température d'utilisation du matériau. Le « matériau idéal » serait en haut à droite. Les composites à matrice organique, s'ils ont une très bonne résistance intrinsèque ramenée à la densité, sont limités aux températures élevées. À l'inverse, quand on regarde tout à droite, les composites « matrice céramique » ou les alliages monocristallins base nickel, qui ne sont pas bien positionnés en densité, le sont en températures. Les ingénieurs rencontrent un perpétuel questionnement autour de la compétition des matériaux : la vérité d'un jour n'est pas forcément celle de demain...

#### 4.2. Une application concrète : les aubes

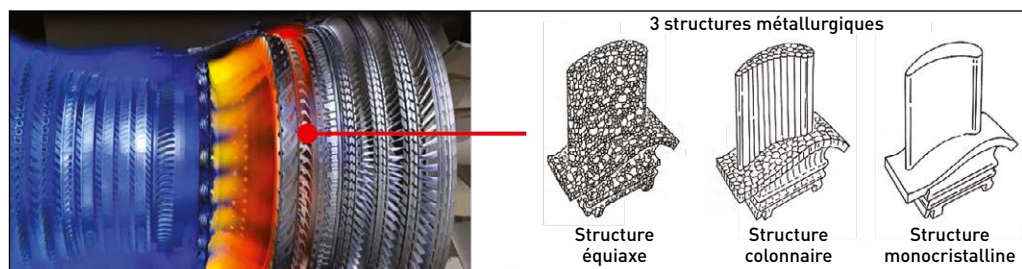
Un des exemples phares d'utilisation des nouveaux

matériaux est illustré par les aubes de turbines les plus sollicitées thermiquement. Aujourd'hui, on utilise des matériaux « bases nickel » (**Figure 25**) fortement dopés, comme on le voit d'après le **Tableau**. Les générations récentes d'alliages base nickel en développement utilisent par exemple du rhénium et du ruthénium.

Afin d'améliorer encore les caractéristiques (de fluage notamment), plusieurs procédés de fonderie sont possibles (**Figure 26**, à droite). On peut chercher à faire croître les grains dans une seule direction (direction de la sollicitation), voire fabriquer un monocristal sans joint de grain. Chez Safran, il existe une fonderie capable de réaliser ce genre de matériaux. Ces nouvelles technologies permettent des gains très importants notamment en tenue en fluage.

Figure 25

Aube de turbine haute pression. À droite : différents types de structures métallurgiques.



Tableau

Exemples de compositions chimiques sur des alliages base nickel applicables aux aubes de turbines haute pression.

	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Hf	Re	Ru	Densité
AM1	7,8	6,5	2	5,7	5,2	1,1	7,9	-	-	-	8,6
CMSX4	6,5	9	0,6	6	5,6	1	6,5	0,1	3	-	8,7
MC-NG	4	< 0,2	1	5	6	0,5	5	0,1	4	4	8,75

Figure 26

Exemple de revêtement.

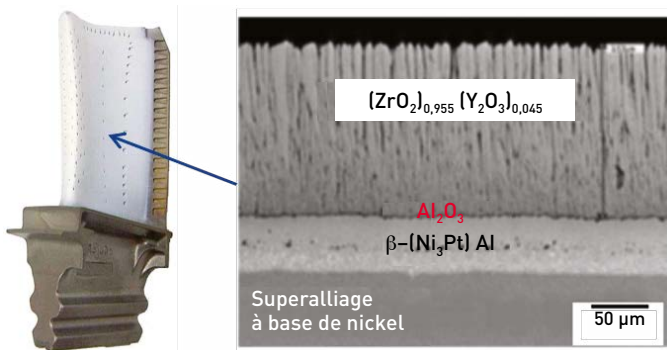


Figure 27

Fabrication de revêtements par « Electron beam physical vapor deposition » (EB-PVD), une technique de dépôt physique en phase gazeuse.

#### 4.3. Les revêtements : une solution pour améliorer les propriétés des matériaux

L'ajout de revêtements (Figure 27) à la surface des pièces permet d'accroître les performances. Notamment pour réaliser une barrière thermique, un revêtement de céramique permet de gagner encore 20-30 °C par rapport à la tenue du matériau. Ces revêtements sont réalisés par traitement sous vide, comme l'EB-PVD (Figure 27), et très prochainement, par projection thermique<sup>15</sup> (Figure 28), qui est un procédé plus simple à mettre en œuvre.

#### 4.4. L'émergence de nouveaux matériaux : une déclinaison d'alliages

Un autre exemple de compétition entre les matériaux est la tuyère d'échappement, ou « exhausts », qui est fortement sollicitée thermiquement. Le matériau de référence est un alliage base nickel (Figure 29), mais aujourd'hui on bascule sur des solutions titane à hautes résistances (Figure 30),

pouvant fonctionner à des températures plus élevées. On a aussi obtenu une certification sur un « exhaust » en composite à matrice céramique (Figure 31). Cette solution a été testée sur un appareil en vol (démonstrateur) mais reste aujourd'hui trop coûteuse. Elle entrera en concurrence avec les autres après réduction de ses coûts.

Que seront les matériaux de demain (Figure 32) ? Le renforcement par des nanomatériaux est une solution souvent citée.

De nouvelles formulations de matériaux apparaissent, comme les matériaux dits à « haute entropie<sup>16</sup> ». Il s'agit de matériaux qui utilisent des éléments proches dans la classification périodique des éléments, et répartis dans des proportions à peu près identiques.

Il existe aussi de nouvelles céramiques, qui pourraient concurrencer les alliages base nickel. Une céramique étant stable jusqu'à 1 500 °C, on n'aurait plus besoin de

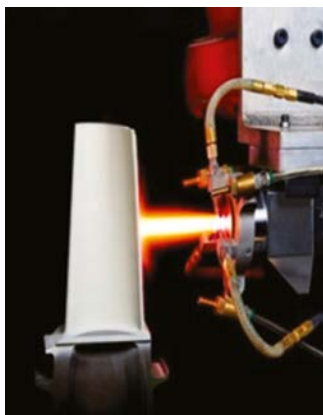


Figure 28

La projection thermique.

15. Projection thermique : technique de traitement de surface.

16. Entropie : nom donné par le physicien allemand Rudolf Clausius à la fonction d'état notée S, qui caractérise, en thermodynamique, l'état de « désordre » d'un système.



Figure 29

Une tuyère en alliage base nickel.



Figure 30

Une tuyère en titane alliage  $\beta$ .



Figure 31

Une tuyère d'un moteur CMC ayant obtenu une certification Sic/SiC.

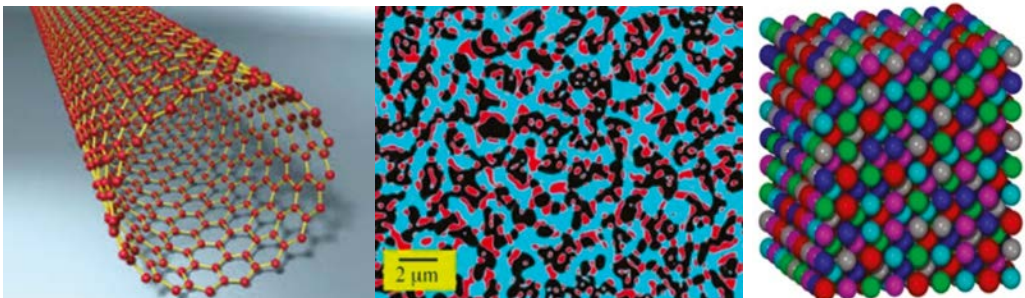


Figure 32

Les nouvelles pistes étudiées dans le domaine des matériaux utilisés en aéronautique.



**Figure 33**

*Méthodes numériques utilisées pour le développement de nouveaux matériaux.*

refroidir les aubes... Ces matériaux sont cependant fragiles ou peu ductiles ; cet aspect reste à travailler.

Les phases MAX, matériaux qui présentent des phases métalliques et des phases céramiques, sont intermédiaires et pourraient fournir des revêtements performants.

#### 4.5. Le design numérique : une nouvelle approche pour l'innovation

Pour développer tous ces matériaux, on travaille de plus en plus avec des approches numériques (modélisation) (**Figure 33**) : le **design numérique des matériaux**.

Les techniques récentes de modélisation permettent de tester de manière théorique un ensemble de compositions différentes pour, en sortie, fournir une évaluation de certaines propriétés comme la

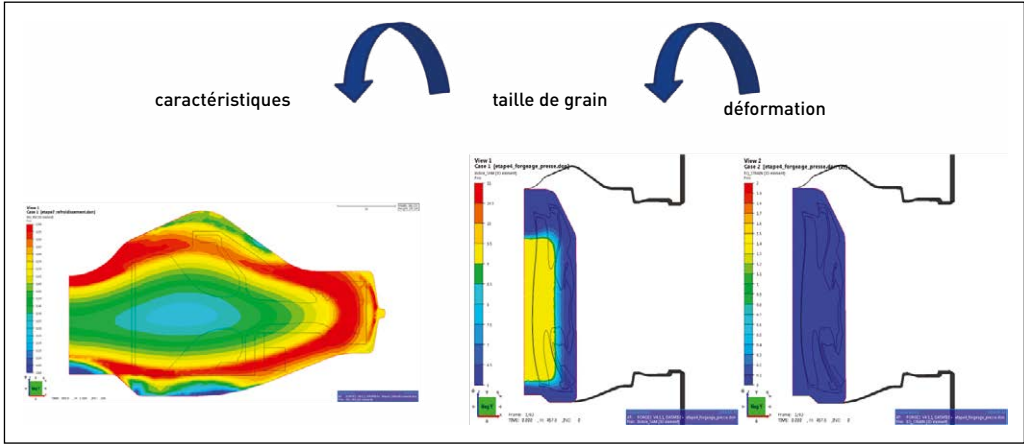
limite élastique<sup>17</sup>, la conductivité<sup>18</sup>, le module d'élasticité<sup>19</sup>, etc. Elles permettent d'aller beaucoup plus vite dans le screening des matériaux (leur sélection), et d'être plus pertinent dans les voies qu'on suit. Il s'agit d'une « révolution » en marche, qui a démarré aux États-Unis, et qu'on est en train de développer. Elle utilise plusieurs outils qui vont de l'échelle atomique ou moléculaire, en passant

17. Limite élastique : contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible, et commence donc à se déformer de manière irréversible.

18. Conductivité : caractérise la capacité des matériaux à diffuser la chaleur, conduire l'électricité ou laisser passer un fluide, sous l'effet d'un gradient de température, de potentiel ou de pression.

19. Module d'élasticité : grandeur intrinsèque d'un matériau, définie par le rapport de la contrainte à la déformation élastique provoquée par cette contrainte.





**Figure 34**

La modélisation dans les procédés : l'exemple de la forge.

par les approches thermodynamiques<sup>20</sup>, voire même l'exploitation des banques de données et des réseaux de neurones (*big data*).

Cette approche permet aujourd'hui de présenter rapidement des pistes de compositions chimiques de matériaux en regard des besoins. Une fois identifiées, ces quelques compositions

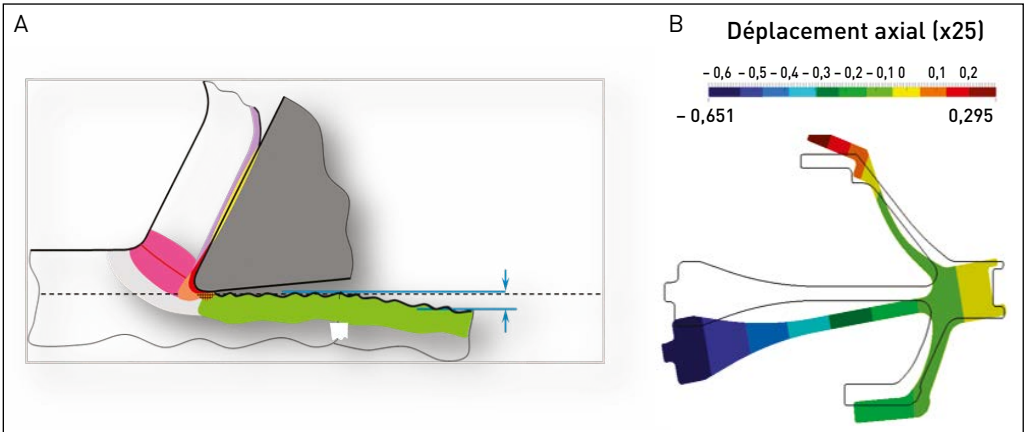
peuvent être réalisées expérimentalement.

La modélisation, qui est partout, l'est également dans les procédés ; elle est devenue un incontournable, que ce soit en fabrication additive, en forge, en soudage ou en fonderie (**Figure 34**).

La **Figure 35** montre l'exemple de la forge. La pièce brute et les étapes de forge sont optimisées pour répondre aux exigences métallurgiques. Ici la modélisation fait apparaître les zones déformées (**Figure 35B**) et, localement,

**Figure 35**

A) Exemple de modélisation du procédé d'usinage : les efforts de coupe (formation du copeau) ; B) la déformation progressive d'une pièce après enlèvement de matière.



20. Thermodynamique : branche de la physique qui étudie les propriétés des systèmes où interviennent les notions de température et de chaleur.

les tailles de grain, et les contraintes résiduelles.

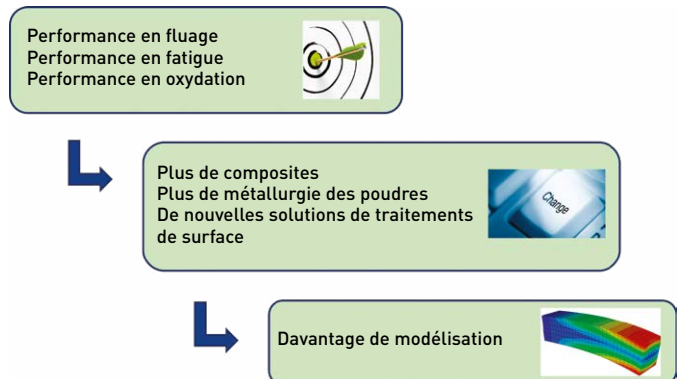
La modélisation aide à concevoir les outillages et la forme du brut pour fabriquer la pièce dans les meilleures conditions.

On réalise également des modélisations en usinage qui permettent d'anticiper la manière dont la pièce va se déformer une fois usinée.

## Synthèse des enjeux et des pistes d'innovation

Les contraintes auxquelles sont exposés les matériaux sont de plus en plus sévères, compte tenu des exigences fonctionnelles plus complexes qui leur sont adressées. En réponse, la conception des matériaux et de leurs procédés de fabrication s'est complexifiée (**Figure 36**) pour répondre aux besoins concernant les propriétés en fluage, en fatigue, en oxydation.

En ce qui concerne les matériaux eux-mêmes, nous verrons de plus en plus de matériaux composites dans les équipements aéronautiques, c'est-à-dire des matériaux mixtes comme les composites matrice organique, composites matrice céramique. Par ailleurs, la métallurgie des poudres va clairement se développer pour répondre en particulier aux besoins de la fabrication additive.



**Figure 36**

*Chemin suivi pour augmenter les performances des matériaux.*

En ce qui concerne les procédés, on atteint aujourd'hui certaines limites sur les procédés conventionnels de coulée ou même de forgeage. Là encore, le passage à la métallurgie des poudres s'impose progressivement sur les pièces thermiquement très sollicitées.

Par ailleurs, il faut beaucoup progresser sur les traitements de surface pour répondre à la réglementation REACH, mais aussi à de nouveaux besoins comme la tribologie<sup>21</sup>, la résistance aux environnements sévères.

Dernier point : la modélisation. À Safran Tech, on ne développe plus de matériaux sans passer par de la modélisation, que ce soit pour identifier la meilleure composition, pour optimiser les procédés de fabrication, ou étudier le comportement mécanique. C'est devenu un outil comme un autre, indispensable pour gagner en performance et réussir les objectifs ambitieux que l'on se fixe.

---

21. Tribologie : science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs.