

Dernières avancées dans les alliages d'aluminium pour applications aéronautiques

Timothy Warner est directeur et « technical expert » à C-TEC, Centre de recherche et technologie de Constellium¹ à Voreppe (Isère).

1 L'aluminium pour alléger des structures

1.1. Origines de Constellium : un passé inscrit dans l'histoire de l'aluminium

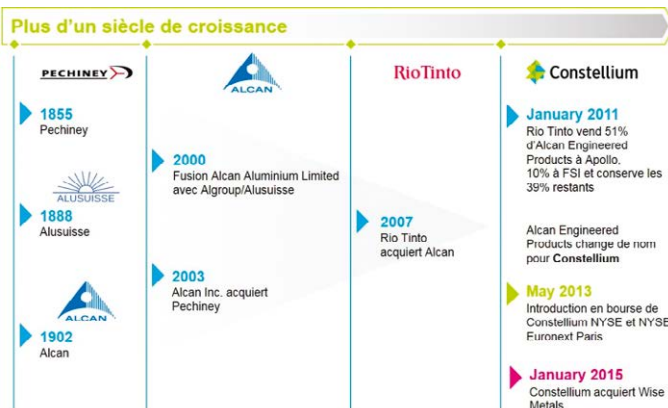
Constellium est un leader mondial dans le domaine du développement et de la fabrication de solutions aluminium innovantes et à forte valeur

ajoutée, à destination des marchés de l'aéronautique (par exemple pour le fuselage d'avions), de l'automobile (carrosseries et systèmes d'absorption de chocs, etc.) et de l'emballage métallique (notamment les canettes boisons). L'histoire de Constellium remonte presque aussi loin que la production commerciale d'aluminium, et son savoir-faire est issu de l'expertise combinée de Pechiney, Alcan et Alusuisse (**Figure 1**).

1. www.constellium.com

Figure 1

L'histoire de Constellium est étroitement liée à l'histoire de l'aluminium depuis l'existence de Pechiney (1855).



La France est un marché clé pour Constellium avec cinq sites industriels de tout premier plan, et C-TEC, le Centre Technologique de Constellium, ouvert en 1967, qui est le centre mondial du Groupe dédié à la R&D sur l'aluminium et ses alliages. Plus de 35 % des effectifs de Constellium sont basés en France.

1.2. Les développements de l'aluminium et de l'aviation sont intimement liés

L'histoire de l'aluminium et celle de l'aviation sont intimement liées. Le premier objet volant plus lourd que l'air fabriqué par l'homme est celui des frères Wright (**Figure 2**). Il contenait déjà de l'aluminium même si ce n'était que dans le carter moteur². Au

moment du DC3, développé dans les années 1930, l'appareil contenait déjà beaucoup d'aluminium, notamment les « longerons³ », poutres cantilever qui ont permis de faire les ailes sans entretoise comme on les connaît aujourd'hui. Un avion beaucoup plus récent, l'A350, contient évidemment beaucoup d'aluminium, et notamment des alliages aluminium-lithium, au sein de la structure interne, et, dans ce cas précis, dans les nervures⁴ de l'avion.

L'aéronautique a considérablement fait progresser les matériaux. Pour illustrer cela, on peut considérer une propriété, la résistance

3. Longeron : élément principal de la structure d'une aile, d'un empennage ou d'un fuselage.

4. Nervure : élément d'aile situé dans le sens du déplacement de l'avion et conférant à celui-ci le profil aérodynamique choisi.

Figure 2

Les avions ont toujours eu de l'aluminium dans leur structure (de gauche à droite : Wright Flyer, DC3 et A350).



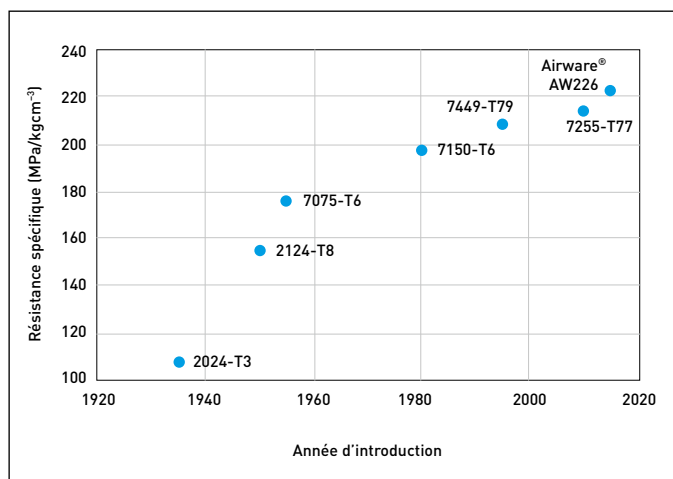


Figure 3

Amélioration continue de la résistance spécifique des alliages d'aluminium depuis leur existence, avec dernièrement l'alliage Airware®.

spécifique, dont on voit les progrès sur la **Figure 3**. La nouvelle famille commercialisée sous le nom d'« Airware® » désigne des alliages aluminium cuivre-lithium et représente un progrès qualitatif.

1.3. La technologie Airware® : un nouveau plus pour l'aéronautique

Les matériaux Airware® sont déjà très présents dans l'aéronautique, dans les nervures de l'A350 par exemple et dans de nombreuses structures internes (**Figure 4**) : le fuselage du Bombardier « Cseries »,

de la fusée SpaceX, dont on voit le barrel⁵ sur la **Figure 4C**, le Bombardier G7000, des appareils d'Embraer et de Boeing, pour ne pas tout citer. Cette famille d'alliage est très largement utilisée. Elle l'est d'ailleurs également dans la structure interne de l'avion. Une application pour Smartphone en présente l'utilisation pour tout public (**Encart : « Une application pour aller regarder l'intérieur de l'avion »**).

5. Barrel : désigne la forme cylindrique du fuselage d'un avion ou d'une fusée.

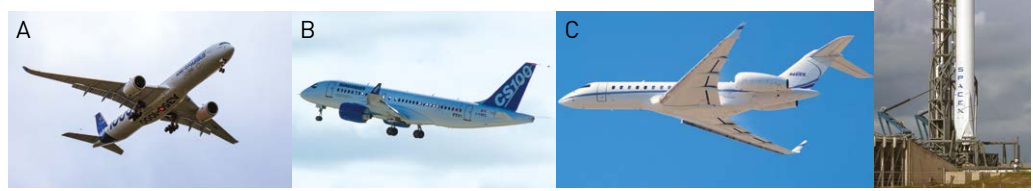


Figure 4

Exemples d'avions dont la structure contient de l'alliage Airware® : structure interne de l'A350 (A), fuselage du Bombardier Cseries (B) et G7000 (C) et d'une fusée SpaceX (D).

Sources : A) Wikimedia, CC-BY-SA-4.0, Clément Gruin ; B) Wikipédia, CC-BY-SA-3.0, Alexandre Gouger ; C) Wikipédia, CC-BY-SA-2.0, Eddie Maloney.

UNE APPLICATION POUR ALLER REGARDER L'INTÉRIEUR DE L'AVION

Il existe une application pour Smartphone, disponible pour tous*, qui permet d'aller regarder à l'intérieur d'une structure aéronautique, voir à quoi cela ressemble, comment c'est construit.

On peut regarder la structure en détail, par exemple la peau (**Figure 5**), qui, même dans le cas de l'A350, est en aluminium.



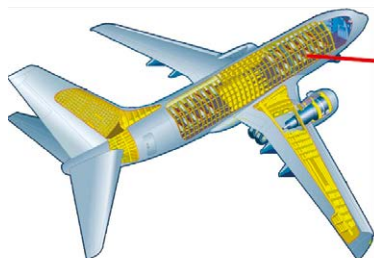
*www.aerospace.products.constellium.com

Figure 5

L'application développée par Constellium permet de voir en détails la structure d'un avion dont la structure a été allégée avec des alliages d'aluminium.

Figure 6

Pièces métalliques livrées par Constellium (panneau de fuselage) qui constituent la structure extérieure d'un avion.



2 L'alliage optimisé à toutes les échelles

L'un des objectifs de notre profession est d'optimiser les microstructures, c'est-à-dire les détails des structures des matériaux. Cela conduit à l'amélioration des propriétés.

2.1. Exemple d'un panneau de fuselage

La **Figure 6** représente un panneau de fuselage, d'un Bombardier CSeries en l'occurrence. Constellium livre la tôle d'aluminium qui constitue le panneau représenté en bas à droite sur la figure : il est « formé », découpé, assemblé avec des raidisseurs. Ensuite les avionneurs⁶ l'incorporent tel quel dans la structure de l'avion.

2.2. Structure à différentes échelles

2.2.1. Au niveau millimétrique

Ce produit est formé de nombreux « grains », qui sont en

6. Avionneur : personne responsable de la conception des plans d'avions, en réalise la construction et en fait les essais.

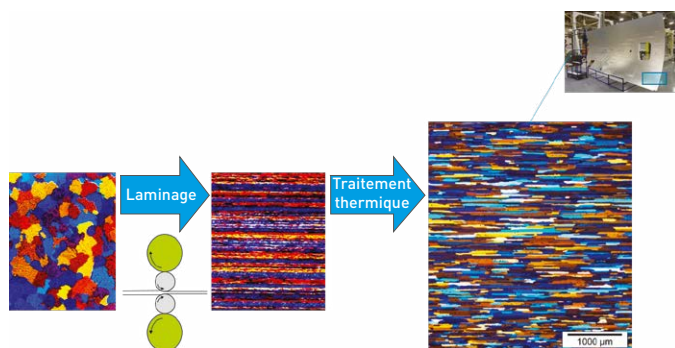


Figure 7

Laminage de la face intérieure d'un panneau de fuselage, vu à l'échelle millimétrique, permettant de lui conférer des propriétés isotropes.

fait des cristaux, et sont alignés comme il apparaît sur la **Figure 7**, représentant une structure recrystallisée⁷. On réalise cette structure à partir d'une coulée d'une structure « équiaxe⁸ », par un laminage induisant un alignement des cristaux d'origine. Un traitement thermique ultérieur recrystallise des grains, plutôt équiaxes, qui confèrent au matériau des propriétés plus ou moins isotropes⁹.

2.2.2. Au niveau micrométrique

L'examen de ces matériaux au niveau micrométrique (**Figure 8**)

7. La recrystallisation correspond à une nouvelle cristallisation de métaux et d'alliages qui se développe à l'état solide, par chauffage, à partir de produits ayant subi un certain taux de déformation.

8. Équiaxe : qualifie une structure dont les axes sont égaux.

9. Isotrope : se dit d'un milieu dont les propriétés physiques sont les mêmes dans toutes les directions de l'espace.

montre que des impuretés comme le fer et le silicium forment des particules intermétalliques. Celles-ci sont nocives pour les propriétés finales du matériau et on essaie de les éliminer. En particulier, dans les alliages pour application aéronautique il est intéressant de diminuer au maximum le fer, dont une certaine concentration demeure, mais c'est une démarche coûteuse.

2.2.3. Au niveau nanométrique

L'examen à une échelle plus petite encore, l'échelle nanométrique, le millième de micron, fait apparaître l'organisation de toutes petites phases, qu'on appelle des phases « durcissantes ». Sur la **Figure 9**, on les voit en section sous forme de traits. En fait, ce sont des disques d'environ quatre ou cinq réseaux atomiques en épaisseur, qui permettent de durcir de façon très efficace les alliages de l'aluminium. Dans

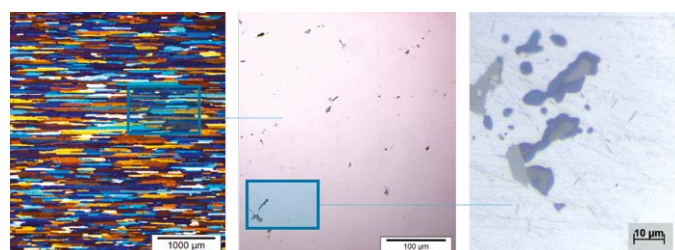
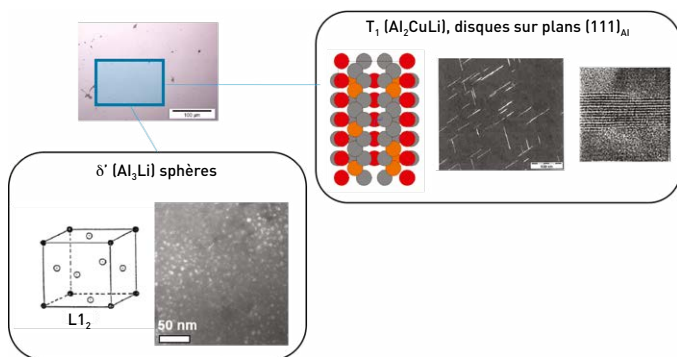


Figure 8

Agrandissement des impuretés restantes à éliminer, comme le fer, sur un panneau de fuselage vu à l'échelle micrométrique (à droite : microscopie optique, polissage sans attaque).

Figure 9

Exemple de deux phases durcissantes dont l'une, T_1 (Al_2CuLi à droite), est très efficace et l'autre, δ' (Al_3Li en bas), est à éviter à cause de son instabilité thermique.



le cas des alliages aluminium-cuivre-lithium, on essaie de maximiser la quantité de T_1 , la phase Al_2CuLi , qui est une phase extrêmement efficace pour durcir et pour créer les propriétés qui nous intéressent. Par ailleurs, la même technique d'observation (la microscopie en transmission) fait aussi apparaître des agrégats de phase Al_3Li dont on cherche à éviter la formation pendant une exposition thermique.

2.2.4. Au niveau atomique

On peut continuer l'examen de ces matériaux au niveau

atomique, par exemple en réalisant des images 3D en sonde atomique¹⁰, une technique qui évapore la matière atome par atome, ce qui permet d'identifier tous les composants. Sur la **Figure 10**, on voit par exemple que les plaquettes contiennent, à côté de l'aluminium, du cuivre

10. Sonde atomique : microscope analytique tridimensionnel de haute résolution qui permet d'observer la distribution spatiale des atomes dans un matériau. Son principe de fonctionnement repose sur l'évaporation par effet de champ des atomes de surface d'un échantillon.

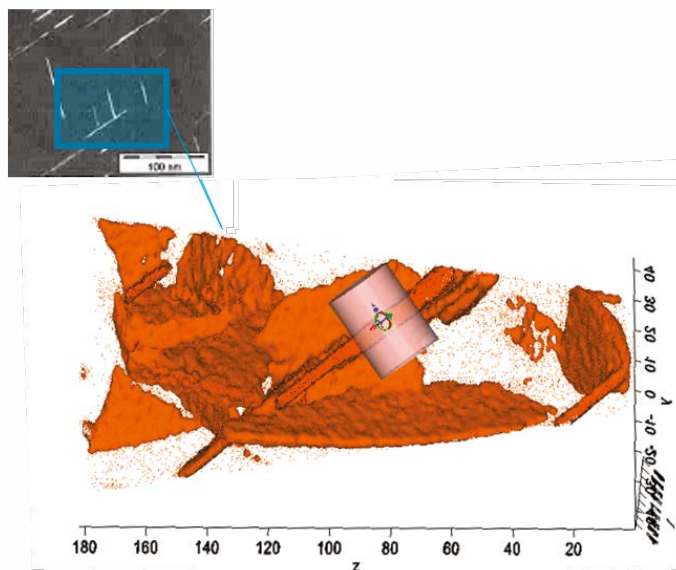


Figure 10

Image résultant du procédé de sonde atomique, permettant d'observer des phases T_1 .

et du lithium, du magnésium et de l'argent. On a en effet rajouté un peu de magnésium et d'argent, qui favorisent la germination¹¹ de ces phases (**Figure 11**) et permettent d'augmenter leur densité numérique.

3 La chimie des alliages, un outil efficace

On vient de voir l'importance de maîtriser finement la composition atomique du matériau. Mais comment parvient-on à cette maîtrise ?

Le procédé industriel consiste en ce qu'on appelle une mise en solution/trempe¹²/revenu (**Figure 12**). La mise en solution du cuivre et du lithium dans le réseau d'aluminium place ces atomes dans le réseau d'aluminium de façon aléatoire. La trempe, c'est un refroidissement soudain qui permet de figer cette solution solide. Le revenu, effectué à une température intermédiaire, favorise la précipitation des phases « durcissantes » recherchées.

3.1. L'utilisation du diagramme de phase...

La réussite de la fabrication de ces matériaux Al-xCu-yLi repose sur une très bonne

11. Germination : phénomène suivant lequel apparaissent les premiers germes cristallins d'une phase solide ou d'un composé.

12. Trempe : traitement thermique qui consiste à plonger dans un bain froid un métal, un alliage, porté à haute température pour conserver à température ambiante une modification de la structure moléculaire obtenue à chaud, et augmenter la dureté des matériaux par exemple.

connaissance du diagramme de phase¹³. La **Figure 13A** représente une coupe cuivre-lithium dans le diagramme de phase Al-Cu-Li. La partie droite du diagramme correspond à des zones de concentrations où le mélange cuivre-lithium peut donner naissance à de nombreuses phases de taille grossière, ce qui est nuisible pour notre projet ; on évitera les concentrations correspondantes. La zone optimale pour réaliser une dissolution aléatoire pouvant donner après trempe les précipités recherchés est figurée en bleu sur la **Figure 13B**.

3.2. ... pour déterminer l'obtention d'un alliage optimisé

Les diagrammes de phase permettent de choisir les conditions « concentration de Li, concentration de Cu, température » où précipiteront les phases durcissantes recherchées, la phase T1 (**Figure 14A**). En fait, on essaiera de se positionner dans la zone indiquée en vert sur la **Figure 14B** pour avoir la phase T1 durcissante, et pas la phase Al₃Li qui diminue la qualité du matériau.

Afin d'affiner la compréhension du système et des mécanismes atomiques à l'œuvre, on se sert aussi de modélisations atomiques. Par la

13. Diagramme de phase : représentation graphique des domaines de l'état physique d'un corps en fonction de différents paramètres possibles (pression, température, fraction molaire/massique, pourcentage d'un élément, etc.).

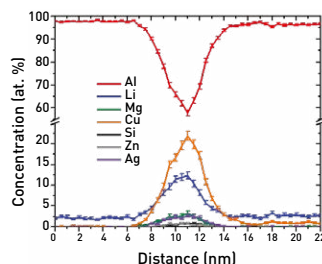


Figure 11

Graphique qui montre que les phases durcissantes sont plus facilement formées avec de l'argent et du magnésium.

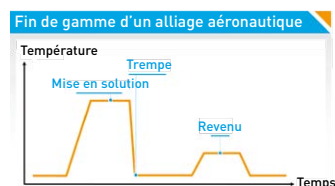
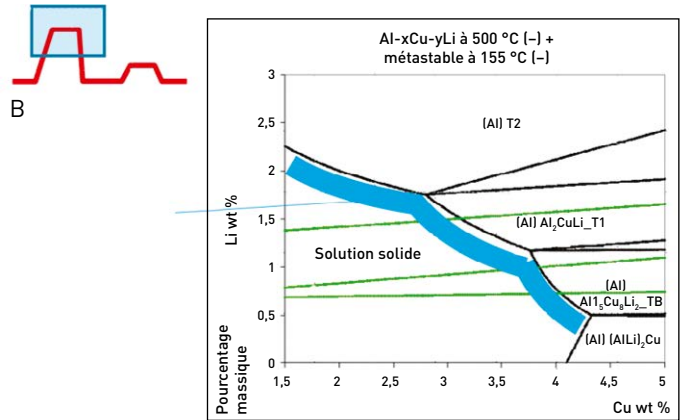
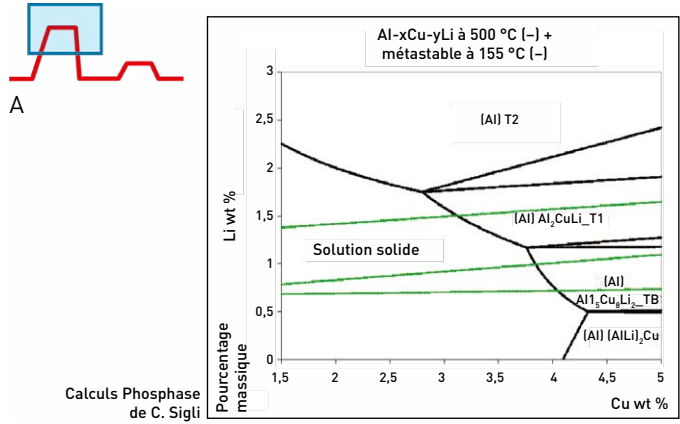


Figure 12

Températures atteintes par l'alliage au cours des différentes phases de traitement.

Figure 13

A) Diagramme de phase, pendant la mise en solution à 500 °C, indiquant les pourcentages de Cu et Li à avoir pour être en solution solide ; B) zone bleue préférentielle pour optimiser la solution solide sans obtenir d'autres phases. Les lignes noires correspondent au diagramme de phase à 500 °C, les vertes au diagramme métastable à 155 °C. Métastable : caractérise un système qui n'est pas stable en théorie, mais qui apparaît comme tel du fait qu'il se transforme très lentement en l'absence d'une perturbation significative.



méthode Monte Carlo, on peut visualiser la propension des phases à se former et la cinétique correspondante. Ces simulations sont des guides extrêmement efficaces pour la conduite du procédé et la sélection fine des conditions expérimentales optimales.

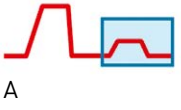
4 Co-optimisation structure-procédé-matériau

Les propriétés des alliages Airware® que nous venons de présenter sont beaucoup plus intéressantes que celles des alliages conventionnels. Cela va apparaître en regardant

les conditions de leur utilisation. Une précision : la solution actuelle, c'est la solution A380 ; pour les alliages type Airware®, c'est la génération utilisée sur l'Airbus A350 et au-delà.

4.1. Des propriétés intéressantes

La Figure 15 montre que sur toutes les propriétés importantes – la résistance, la fatigue, la corrosion, etc. –, on a des gains importants et du même ordre de grandeur pour toutes. À la limite on pourrait prendre une pièce donnée, simplement la remplacer



A

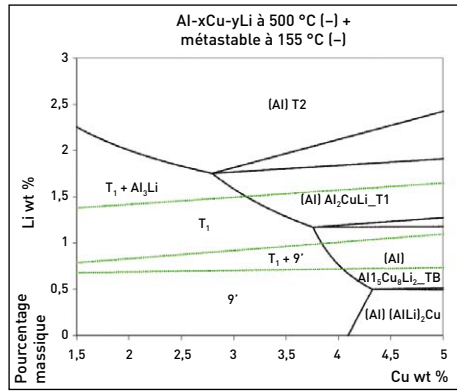
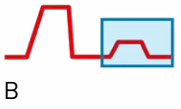
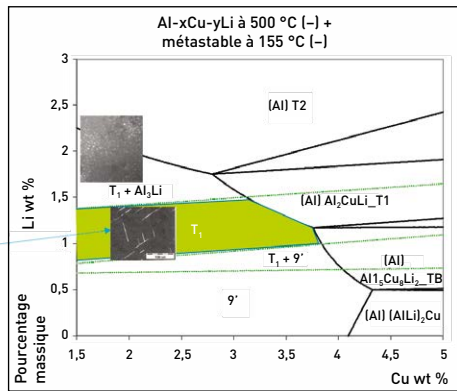


Figure 14

A) Diagramme de phase pendant le revenu à 155 °C indiquant les différentes solutions solides obtenables dont celles contenant la phase $(T_1 + \delta')$ et la phase T_1 seule ; B) la zone verte contenant uniquement la phase T_1 est la plus optimale pour ses propriétés de résistance.

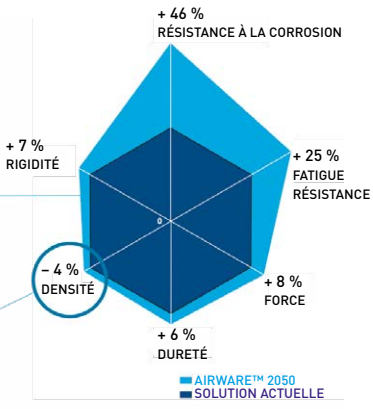


B



Zone optimale à 155 °C pour la phase durcissante T_1 : maximisant résistance/ténacité en évitant la phase Al_3Li , associée à une instabilité thermique

- Jusqu'à ~ 20 % de poids
Co-optimiser structure - matériau - assemblage
- 7 à - 12 % de poids
Réduire les sections grâce aux propriétés améliorées
- 3 à - 6 % de poids
Profiter de la réduction de densité



AIRWARE™ 2050
T84 PLATE

Figure 15

Les alliages Airware® sont nettement plus performants que les anciens alliages en aluminium, permettant jusqu'à 20 % de poids en moins dans une structure aéronautique.

Figure 16

Les nouvelles technologies de soudage – ici le « Linear Friction Welding » (LFW) – permettent de fabriquer par exemple des nervures avec une efficacité mécanique et un taux d'utilisation de la matière très élevés.

A) Démonstrateur de concept où les ébauches de quatre pieds de nervure ont été soudés à l'âme ; la moitié gauche de ce démonstrateur a ensuite été usinée. ; B) une nervure complète fabriquée en Airware® avec cette technologie.



avec la même géométrie, et on obtiendrait un gain sans dépenser pour étudier une nouvelle conception, si on peut gagner ne serait-ce que 4 % en densité.

Cela étant, en optimisant le matériau, la structure et les procédés par des

programmes de recherche appropriés, on peut obtenir un gain en poids de 15 à 25 %. Les calculs sous-tendant ces estimations de gain ont été réalisés de façon collaborative entre Constellation et ses clients aéronautiques, dont Airbus et Dassault.

L'aluminium et l'aéronautique : un mariage toujours plus solide

Les matériaux de la famille Airware® sont le développement le plus récent de l'utilisation de l'aluminium pour l'aéronautique. La finesse des moyens d'étude physiques, théoriques et expérimentaux, et physico-chimiques accessibles aujourd'hui est indispensable pour tirer le maximum de ses propriétés, les comprendre et les reproduire, maîtriser les compositions précises des composants principaux bien sûr, mais aussi apporter de « petits ajouts » sans lesquels rien ne serait.

Les avantages de l'Airware® qui ont été cités ont laissé de côté des propriétés pourtant aujourd'hui très appréciées : c'est un matériau éco-efficace,¹⁴ étant à la fois 100 % recyclable et léger.

Un exemple de plus qui montre la nécessité pour les industriels de se maintenir à la pointe des propositions techniques et scientifiques mises au point par les laboratoires.

14. Éco-efficace : notion qui désigne des produits ou des services caractérisés par un rapport matière/usage amélioré.