

Les alliages d'aluminium pour l'allégement des structures dans l'aéronautique et la carrosserie automobile

Bruno Dubost est directeur scientifique de Constellium¹ et membre de l'Académie des technologies.

La durabilité dans les transports est très liée aux problématiques d'allégement pour lesquelles les enjeux sont grands pour les matériaux. Nous verrons la place de l'aluminium et le rôle clé de la chimie dans la métallurgie des alliages d'aluminium, notamment celle des alliages « à durcissement structural », et le développement de solutions innovantes pour l'allégement des structures dans l'aéronautique et dans l'automobile.

1 Allégement des structures et durabilité pour le transport aéronautique et automobile

1.1. Les matériaux de grande diffusion à hautes performances spécifiques : un levier clé de l'allégement des structures d'avions et d'automobiles

Quand on considère un matériau, il faut examiner deux aspects : la matière et les fonctionnalités ; on évolue de plus en plus vers des demandes

1. www.constellium.com

Figure 1

Les différents types de matériaux de grande diffusion en fonction de leurs performances spécifiques, rapportées à la densité.

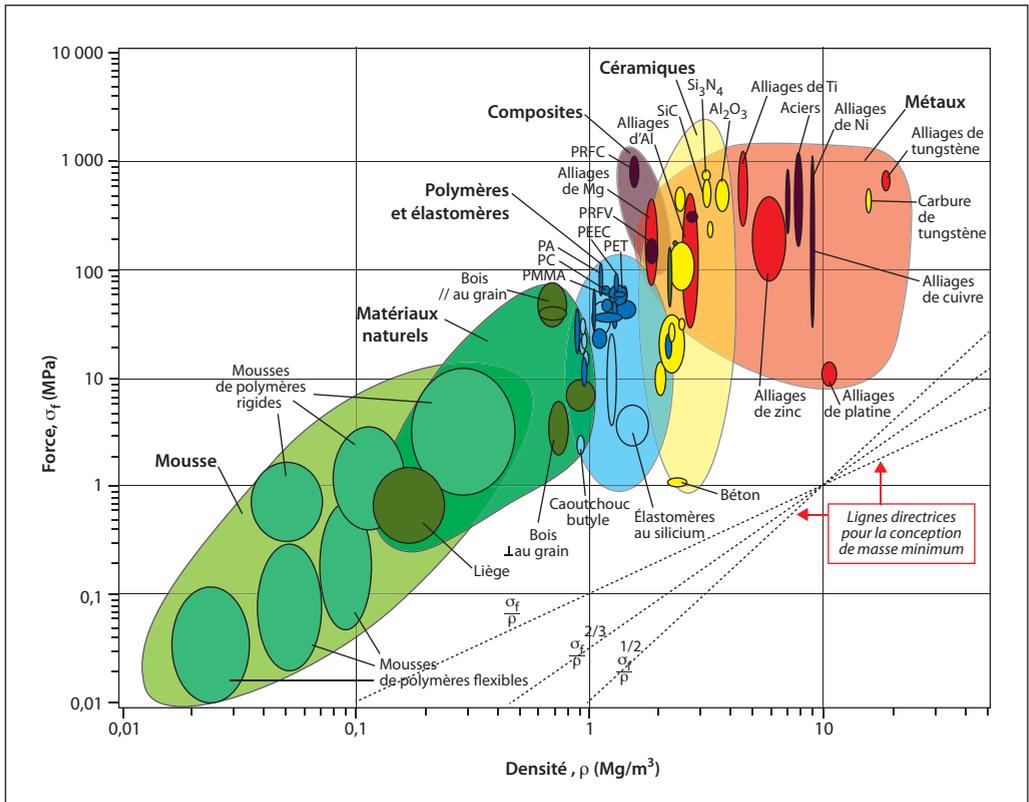
PMMA = polyméthacrylate de méthyle ; PC = polycarbonate ; PA = polyamide ; PET = polyéthylène ; PEEC = polyéther éther cétone ; PRFV = plastique renforcé à la fibre de verre ; PRFC = plastique renforcé à la fibre de carbone.

Source : GrantaDesign-CES
 Edupack (entreprise spécialisée en technologie de l'information sur les matériaux)

de multifonctionnalité. Nous parlerons principalement des fonctionnalités structurales et des exigences liées à la fabrication et à l'utilisation des matériaux, c'est-à-dire à leur aptitude à être élaborés, mis en forme et mis en œuvre, auxquelles s'ajouteront des exigences de durabilité, et bien sûr de coût.

Le choix des matériaux est immense. La **Figure 1** permet de comparer les matériaux en les classant en familles (métaux, céramiques, polymères et élastomères, composites, matériaux naturels, mousses) selon leur résistance mécanique (ici la limite d'élasticité), et leur densité (les échelles sont logarithmiques).

Les matériaux structuraux formables sont essentiellement métalliques. La compétition est intense entre les matériaux de structure métallique dans le domaine de l'allègement, notamment entre les aciers – matériau de référence dans les structures d'automobiles –, les alliages d'aluminium – matériau de référence dans la construction aéronautique – et, pour certaines applications spécifiques à l'aéronautique, les alliages de titane. La densité de l'aluminium est de 2,7 et celle du titane est de 4,5 alors que celle du fer est de 7,9. On trouve également, en compétition avec les métaux dans le domaine des densités



faibles, les composites² avec les classes de composites à matrice polymère renforcés par des fibres de carbone – en fort développement dans la construction aéronautique – et ceux à fibre de verre, utilisés en carrosserie automobile.

Dans cette compétition entre matériaux, il faut aussi tenir compte des exigences de coût. On doit considérer le surcoût tolérable par le constructeur résultant de l'allègement (par kg d'allègement sur pièce finie) quand il s'agit de comparer, par exemple, des solutions aciers et aluminium dans l'automobile, ou de nouveaux alliages d'aluminium et des composites dans l'aéronautique.

Les surcoûts acceptables varient beaucoup d'un domaine à l'autre : les différences sont de plusieurs ordres de grandeurs entre l'automobile et l'aéronautique et, a fortiori, le spatial. Pour l'automobile, le surcoût typique acceptable est entre 2 € et 10 €, voire maximum 8 € par kilogramme d'allègement, selon la pièce et le constructeur (**Tableau 1**).

1.2. L'aéronautique : des défis et des exigences élargies pour les matériaux dans le contexte de structures désormais hybrides (aluminium, composites, titane)

Dans l'aéronautique, de nombreux défis sont posés aux constructeurs et aux

Tableau 1

Surcoûts d'allègement typiques acceptables pour les matériaux (€/kg).

Marché	Surcoût d'allègement typique acceptable (€/kg)
Défense et Spatial	1 000–10 000
Aéronautique	100–1 000
Automobile	2–10

fabricants de matériaux, et les exigences sont larges (**Tableau 2**). On parle désormais de structures hybrides. C'est maintenant une règle générale dans la conception des structures de ne plus considérer des structures monolithiques (formées d'un seul matériau) : on met en œuvre différentes classes de matériaux, métalliques (principalement alliages d'aluminium, et aussi, en liaison avec les composites, alliages de titane) et composites, selon des conceptions optimisant le choix du matériau vis-à-vis de son emplacement et des fonctions à assurer.

Les défis à relever se trouvent donc au niveau des propriétés d'ensemble des produits : performance, maintenance, poids et coût des avions, mais aussi problématiques de corrosion, de tolérance aux dommages, de tenue en fatigue, de réparabilité et de fiabilité. En effet, si l'allègement est un objectif de premier ordre pour les fournisseurs, l'augmentation de la durée des intervalles de maintenance est prise en compte, car la cette dernière coûte cher. La chimie des matériaux, à travers la métallurgie des alliages et la science de leurs procédés d'élaboration et de traitements

2. Un matériau composite est constitué d'une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique et d'un liant appelé matrice qui assure la cohésion de la structure et la transmission des efforts vers le renfort.

Tableau 2

Les défis de la chimie dans l'aéronautique (d'après Eberl et coll., Constellium, 2011).

Défis		Exigences	Domaines Impact de la chimie
Produits	Performance – Poids et coût	Allègement	Chimie des matériaux, métallurgie physique
	Maintenance – Corrosion – Fatigue et tolérance au dommage – Réparation Risques limités – Fiabilité – Prédictabilité	Augmentation des intervalles de maintenance	Mécanique des matériaux et des structures
Opérations	Fabrication Intégration chaîne ss-traitance Montée en cadence « Right first time »	Réduction des coûts et des cycles de fabrication des aérostructures	Chimie et génie des procédés : – élaboration des matériaux, fusion, solidification – assemblage
Durabilité	Émission de CO ₂	Procédés et solutions durables de fabrication et de mise en œuvre	– traitement et revêtement de surfaces
	Bruit Consommation – Eau, énergie Recyclage complet – Déchets, avions Empreinte carbone	Recyclabilité	– recyclage

thermiques, impacte directement ces défis, avec la mécanique des matériaux et des structures.

Au niveau de la fabrication des avions, il faut intégrer les défis de montées en cadence et les problèmes qui peuvent en résulter dans la chaîne de sous-traitance. La réduction des coûts doit aussi concerner ceux des cycles de fabrication des aérostructures. Par exemple la production d'avions de ligne monocouloirs au rythme de quarante à soixante

exemplaires par mois impose que les matériaux utilisés se mettent en œuvre facilement.

De plus, on vise maintenant à développer des procédés et des solutions durables, à la fois de fabrication et de mise en œuvre (voir le **Chapitre de J. Botti**). La recyclabilité est un aspect non négligeable qui doit être pris en compte dès la conception, notamment dans le cas de structures hybrides. C'est un atout pour les métaux, dès lors que l'on peut les séparer de façon satisfaisante en fin de vie.

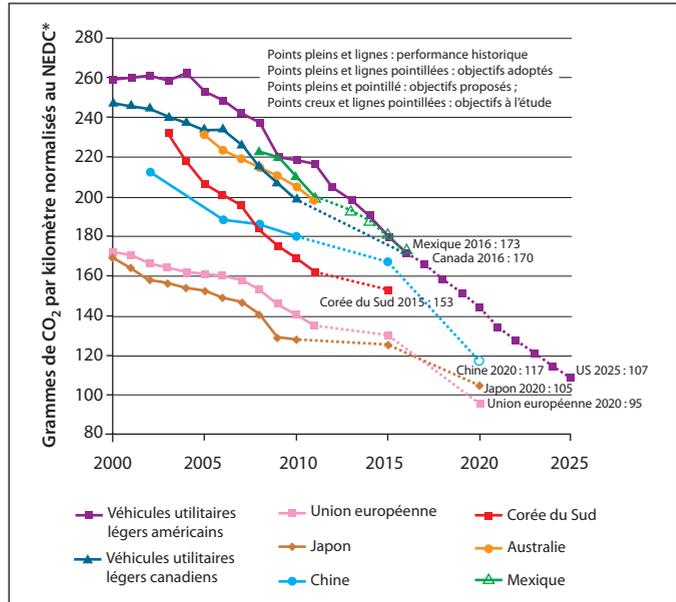
Le respect de ces exigences repose encore sur la chimie et le génie des procédés en particulier pour les étapes d'élaboration des matériaux, de fusion, de solidification des métaux, ainsi que les étapes d'assemblage, les traitements de surface et le recyclage.

1.3. L'automobile : le défi de la durabilité pour satisfaire des réglementations convergentes dans le monde

Dans le secteur de l'automobile la durabilité est un défi (voir les **Chapitres de J.-P. Brunelle et L. Vaucenat**). Il faut satisfaire les réglementations qui sont convergentes dans le monde sur les émissions gazeuses, en grammes d'équivalents CO₂ par kilomètre³, prévues jusqu'à 2025 (**Figure 2**).

L'Europe est en tête, avec les exigences les plus sévères puisqu'il faudra diminuer les émissions gazeuses qui étaient de 140 g/km en 2010 à 95 g/km en 2020. Suivent le Japon, puis les États-Unis, où il faudra réduire de moitié les

3. Les émissions de CO₂ mesurent un impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre généré par une consommation énergétique dite « finale », pour un usage ou pour une somme d'usages. Les émissions de CO₂ sont évaluées selon deux conventions, soit en émissions directes dues à l'utilisation de l'énergie chez le consommateur final, soit en analyse du cycle de vie, tenant compte des émissions dues à l'utilisation de l'énergie mais également des émissions aval dues aux chaînes d'approvisionnement et de transformation énergétique (production, transport, distribution, recyclage éventuel).



émissions gazeuses à l'horizon 2025.

Les principaux leviers d'action sont la propulsion, la masse (allégement), la diminution des pertes d'énergie par les phénomènes parasites tels que les frottements et l'aérodynamisme.

L'allégement est un facteur important ; retenons que 100 kg d'allégement des structures entraîne des réductions d'émissions de gaz à effet de serre qui sont variables selon les pièces, typiquement jusqu'à 8 à 10 g d'équivalent CO₂ par km.

1.4. L'allégement de l'automobile ou répondre au défi de la durabilité avec des matériaux performants

Le **Tableau 3** résume les leviers pour répondre aux défis de durabilité de l'automobile. Le premier, le plus important, est la propulsion (voir les **Chapitres de S. Candel**,

Figure 2

Normes sur les émissions de CO₂ (en grammes d'équivalents CO₂ par kilomètre) selon les années et pays.

*NEDC (New European Driving Cycle) = nouveau cycle européen de conduite. C'est un cycle de conduite automobile conçu pour imiter de façon reproductible les conditions rencontrées sur les routes européennes.

Source : www.theicct.org

Tableau 3

Les défis et leviers de durabilité pour l'automobile.

Source : White, Jaguar Land Rover, Global Automotive Lightweight Solutions Conference, Londres, 2012

Propulsion	Masse	« Parasites »
Véhicules hybrides	Efficiéce en masse	Aérodynamique
Véhicules électriques	Architecture du véhicule	Résistance au roulement
Volant (cinétique)	Caisse en blanc, ouvrants	Gestion de l'énergie
Combustion	Liaisons au sol	du groupe motopropulseur et thermique
Transmission	Mise en œuvre des matériaux	– Châssis (systèmes)
Direction	Technologies d'assemblage	– Systèmes électriques
Efficacité du groupe motopropulseur	Analyse de cycle de vie	– Systèmes de climatisation
	Masse vs. fonctionnalités	

S. Jullian et H. Trintignac), que nous n'aborderons pas dans ce chapitre.

En second viennent les gains de masse avec des solutions de matériaux durables et performants qui interviennent dans les carrosseries, notamment les ouvrants et, plus largement, la « caisse en blanc », mais aussi dans les pièces de liaisons au sol. Les défis concernent non seulement le choix des matériaux (aciers, alliages d'aluminium, polymères, composites), mais aussi leur assemblage et leur mise en œuvre. Le choix des matériaux est optimisé *via* une conception hybride de matériaux et de structures. Si les aciers constituent encore l'essentiel du poids du véhicule et continuent à évoluer, notamment vers des aciers à très haute résistance mécanique pour structure de « caisse en blanc », l'aluminium progresse avec la mise en œuvre de nouveaux alliages ; c'est un domaine clé de recherche et développement pour la métallurgie (donc pour la chimie) et pour la mécanique.

1.5. La forte pénétration de l'aluminium en Europe et dans le monde

La **Figure 3** montre l'évolution de la masse d'aluminium par véhicule et selon les pièces automobiles en Europe. On voit que c'est dans le domaine de la carrosserie, des ouvrants et des pare-chocs (en rouge) que l'utilisation de l'aluminium se développe le plus, avec une croissance annuelle remarquable de 17 %. C'est dans le domaine des pièces de fonderie dans les groupes motopropulseurs et dans les roues (en bleu) que s'est d'abord développé l'aluminium (par rapport à la fonte), avec les alliages de moulage, pour atteindre aujourd'hui un niveau élevé mais de croissance modeste (1 % par an). L'aluminium est également très utilisé dans les échangeurs thermiques du fait de la bonne conductivité thermique associée à une faible densité, de la résistance à la corrosion et de l'aptitude au formage et au brasage des alliages. L'aluminium progresse de manière plus importante (5 % de croissance

annuelle) dans les pièces de liaisons au sol et les suspensions.

La croissance de l'aluminium en Europe dans les carrosseries et les ouvrants est liée à l'expansion géographique des constructeurs européens de voitures de gamme « premium » qui utilisent de l'aluminium au lieu de l'acier, en particulier les constructeurs allemands. Il en est de même aux États-Unis, où chez des constructeurs comme Ford, la totalité de la carrosserie de certains nouveaux modèles est maintenant en aluminium. Le remplacement de l'acier par l'aluminium est incrémental dans les ouvrants chez tous les constructeurs, et il est prévu que, d'ici 2020, 45 % des capots (soit 9,4 millions de capots) soient en aluminium.

1.6. Le cycle de vie de l'aluminium dans les transports

1.6.1. Importance de la phase de recyclage

Nous avons vu que l'allègement résultant de l'utilisation massive de l'aluminium entraîne des économies de carburant, des réductions d'émissions et des améliorations de performance.

Un autre paramètre fondamental à prendre en compte dans l'analyse du cycle de vie de l'aluminium est le recyclage, qui a un impact particulièrement important sur la réduction de l'empreinte environnementale des matériaux de grande diffusion utilisés dans les transports. En effet, le recyclage de l'aluminium permet des économies d'énergie de 95 % au stade

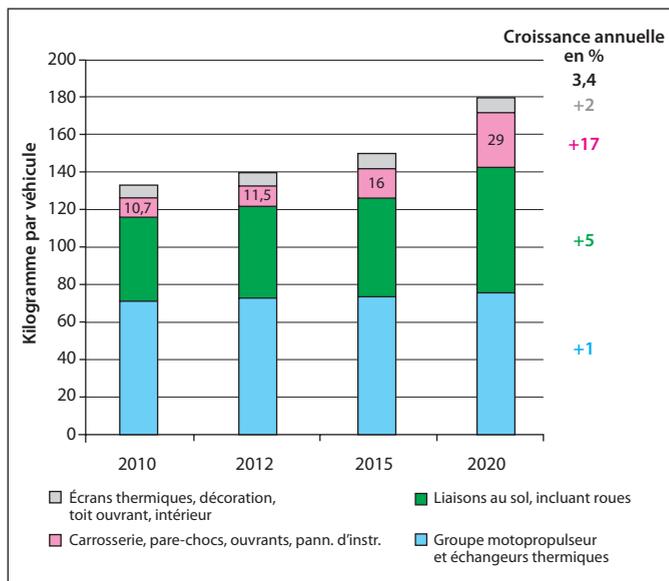


Figure 3

La masse d'aluminium par automobile en Europe selon les années et les types de pièces.

Source : Ducker WW – EAA
Aluminium penetration in cars – 2012

de la refusion, et de l'ordre de 90 % au stade du demi-produit transformé, et donc des réductions importantes d'émissions de gaz à effets de serre par rapport à la production d'aluminium primaire, qui est très énergivore. Le développement du recyclage est donc une étape clé du développement de l'utilisation de l'aluminium. Le métal peut être récupéré tout au long de la chaîne, de la production à la fin de vie des produits, tout en permettant de conserver ses propriétés. Il est donc important qu'il puisse être récupéré et recyclé dans la même filière, c'est-à-dire pour fabriquer des pièces à hautes performances avec des alliages recyclés, grâce à des techniques de séparation par alliages ou familles d'alliages sur la base des caractéristiques chimiques, physiques ou géométriques des produits. On considère que 75 % de l'aluminium produit depuis les années 1880 – c'est-à-dire

depuis l'utilisation de l'aluminium industriel – est encore en service.

1.6.2. Importance de la phase d'utilisation

Des analyses de cycles de vie (ACV) sont effectuées par les constructeurs. L'ACV doit prendre en compte la totalité du cycle. Dans l'automobile, la contribution de la phase d'utilisation du matériau à l'émission de gaz à effets de serre est beaucoup plus importante que la part élaboration du matériau – fabrication du produit (**Figure 4**). Par comparaison, la phase de fin de vie du produit (recyclage) émet peu de gaz à effets de serre. Agir par l'allègement sur la phase d'utilisation présente donc un enjeu majeur pour la réduction des émissions gazeuses. Il faut aussi travailler sur des unités fonctionnelles bien définies quand on compare des matériaux, et avoir une bonne traçabilité des hypothèses.

C'est l'un des axes en cours dans le cadre du nouvel Institut

de recherche technologique Matériaux, Métallurgie, Procédés (IRT-M2P) à Metz, pour lequel les constructeurs et les producteurs travaillent ensemble pour faire progresser les méthodes d'évaluation des cycles de vie et de recyclage.

2 Métallurgie des alliages d'aluminium

2.1. Les alliages d'aluminium pour alléger les structures : familles et caractéristiques mécaniques typiques

Rappelons d'abord quelques bases de la métallurgie des alliages d'aluminium.

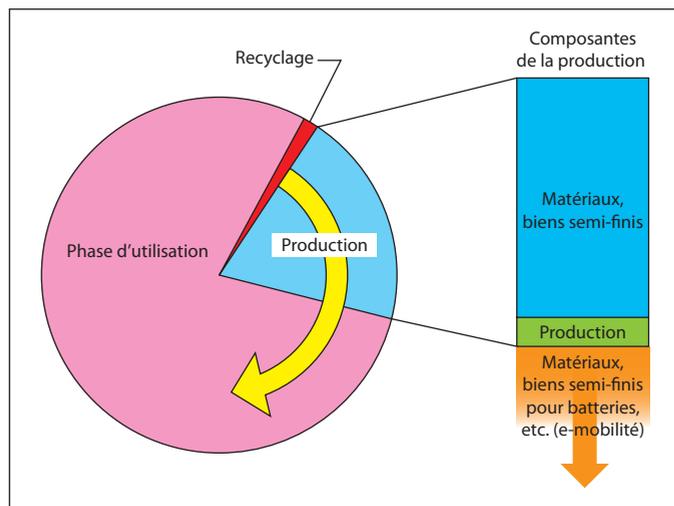
Un alliage d'aluminium, c'est de l'aluminium auquel sont ajoutés des éléments d'additions solubles et mobiles dans le métal, à effet durcissant ; les principaux sont le cuivre, le lithium, le magnésium, le silicium et le zinc (l'un ou l'autre de ces deux derniers éléments étant associé au magnésium). À ces éléments d'addition principaux s'ajoutent en faibles teneurs des éléments secondaires, essentiellement constitués de métaux de transition (chrome, manganèse, zirconium, etc.), peu solubles et peu mobiles, qui agissent sur la structure granulaire des alliages (structure et forme des cristaux (grains) d'aluminium). Le fer, très peu soluble, est une impureté, de même que le silicium dans la plupart des alliages hors Al-Mg-Si.

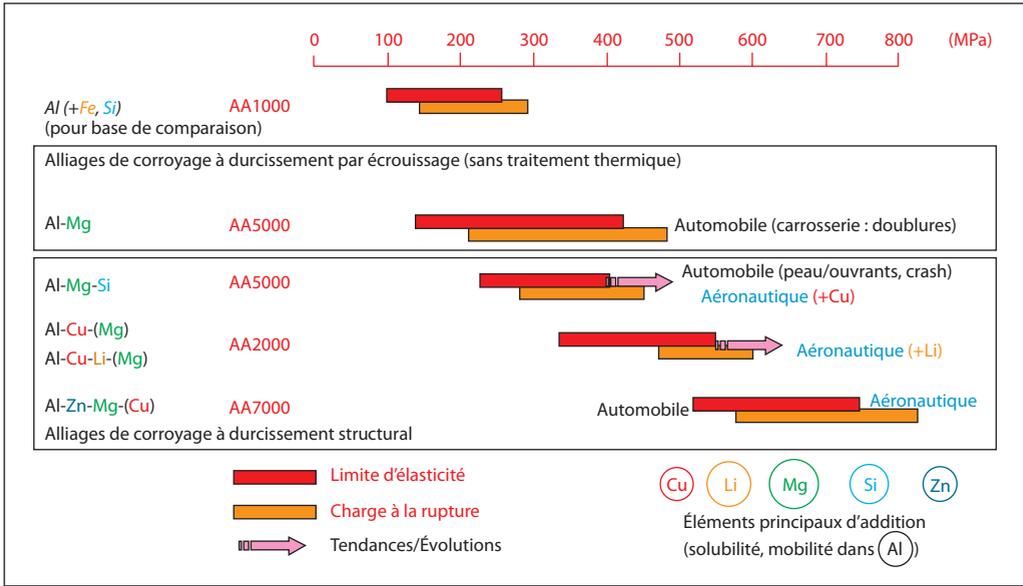
Deux principaux types d'alliages d'aluminium sont utilisés pour alléger les structures : les alliages à

Figure 4

Les contributions des phases du cycle de vie de l'automobile à l'émission de gaz à effet de serre.

Source : Haberling, Audi, Global Automotive Light-weight conf., 2012





durcissement par écrouissage⁴ et les alliages à durcissement structural (Figure 5). Les alliages à durcissement par écrouissage sont mis en forme par déformation plastique, principalement par laminage⁵ et peuvent subir des traitements thermiques d'adoucissement. Ce sont principalement des alliages aluminium-magnésium, beaucoup utilisés en carrosserie automobile pour les doublures. Ils sont très formables, mais peuvent

conduire à des aspects de surface après déformation non appropriés pour utilisation en peau extérieure de carrosserie.

Les alliages dont l'utilisation se développe le plus actuellement sont les alliages à durcissement structural mis en forme par laminage, filage⁶ ou forgeage, qui subissent des traitements thermiques durcissants. Ce sont les interactions entre les défauts créés par la déformation plastique et les particules nanométriques riches en éléments d'addition (précipités) créées lors du traitement thermique qui régissent les propriétés mécaniques. La Figure 5 donne

Figure 5

Familles d'alliages d'aluminium pour structures et caractéristiques mécaniques typiques.

4. L'écrouissage est le durcissement « définitif » d'un métal sous l'effet de sa déformation plastique. Par exemple, lorsque l'on tord un fil de fer, il est impossible de le remettre complètement à plat : la partie coulée garde une déformation car elle s'est durcie.

5. Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique, obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres contrarotatifs appelés laminoirs.

6. Le filage est un procédé de fabrication mécanique par lequel un matériau compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. On forme en continu un produit long (tube, tuyau, profilé, fibre textile) et plat (plaque, feuille, film).

la limite d'élasticité pour chaque famille ; elle peut atteindre pratiquement plus de 700 MPa. On voit que l'on peut multiplier par vingt ou vingt-cinq la limite d'élasticité d'un matériau comme l'aluminium en lui ajoutant des éléments d'alliages et en lui faisant subir les traitements thermiques adaptés.

Les alliages aluminium-magnésium-silicium sont de plus en plus utilisés dans l'automobile, en particulier pour la « peau », les ouvrants et ce qui doit résister aux crashes (pare-chocs, « crash box », etc.). Pour l'aéronautique, on ajoute du cuivre pour améliorer les propriétés mécaniques. Les alliages traditionnels les plus anciens sont des alliages durs au cuivre et au magnésium. Ils ont beaucoup évolué et l'on ajoute aujourd'hui du lithium au cuivre pour augmenter la résistance mécanique et la tolérance aux dommages.

Les plus durs de tous les alliages actuels sont les alliages au zinc et magnésium avec ajout de cuivre pour les applications aéronautiques. Les alliages aluminium-zinc-magnésium (Al-Zn-Mg), à haute résistance mécanique, se développent dans les structures pour automobile.

2.2. Métallurgie des alliages d'aluminium à durcissement structural

La thermodynamique chimique et la compréhension des diagrammes d'équilibre de phases sont des bases de la métallurgie des alliages. Il faut d'abord choisir les éléments d'addition qui devront être solubles faci-

lement dans la matrice d'aluminium à haute température mais peu solubles à basse température. Il faut que ces éléments soient mobiles et capables de diffuser dans le réseau des atomes d'aluminium. Les alliages ternaires (Al-Cu-Mg, Al-Cu-Li, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg) sont généralement constitués à la fois d'éléments principaux à rayon atomique relativement petit (Cu, Si ou Zn) et gros (Mg, Li) par rapport aux atomes d'aluminium constituant la matrice.

2.2.1. La mise en solution solide des éléments de l'alliage

La **Figure 6** montre un exemple du diagramme d'équilibre de phase dans le cas d'un binaire très simple d'un alliage d'aluminium au cuivre – mais on travaille le plus souvent avec des alliages ternaires ou quaternaires.

Le traitement thermique consiste à porter un mélange d'aluminium et de cuivre (ou d'alliage au cuivre et de particules intermétalliques Al_2Cu solubles à haute température) d'une composition donnée, correspondant à la composition de l'alliage que l'on veut obtenir, jusqu'à une température (flèche rouge) où l'élément d'alliage (ici le cuivre) est dissous à l'état solide, c'est-à-dire en solution solide⁷ (zone bleue) dans la matrice d'aluminium. C'est l'étape de mise en solution.

On fige la solution solide ainsi obtenue par une trempe, c'est-à-dire un refroidissement

7. En thermodynamique, la solution solide est un mélange de corps purs formant un solide homogène.

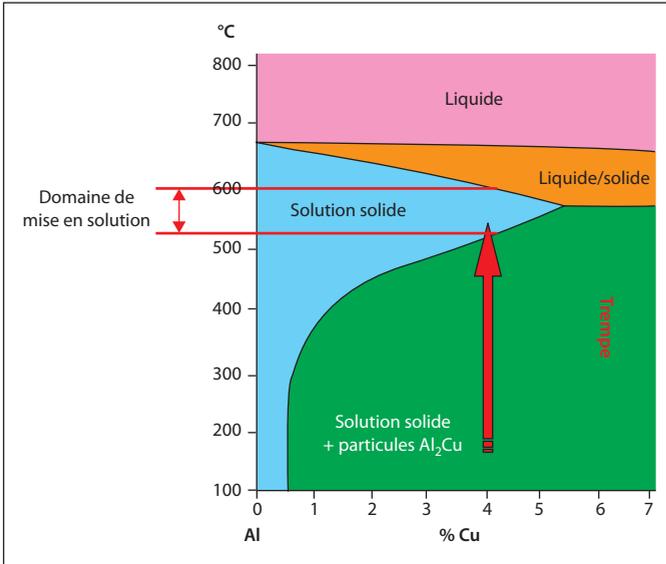


Figure 6

Diagramme d'équilibre des phases binaire aluminium-cuivre (teneur en Cu en poids %). La phase d'équilibre Al_2Cu (composé intermétallique contenant environ 53 % de Cu) n'est pas représentée sur la droite.

brutal du matériau jusqu'à la température ambiante qui fige la structure en évitant qu'elle se décompose sous forme d'équilibre avec des composés grossiers (zone verte). Ce faisant, on obtient une solution solide qui est métastable : elle va se décomposer ultérieurement, mais sous forme extrêmement fine et dense, d'amas d'atomes de soluté puis de toutes petites particules, de taille nanométrique, qui vont être responsables du durcissement structural lors des étapes ultérieures de maintien à température ambiante puis de traitement thermique final.

2.2.2. Les étapes du traitement thermique

La **Figure 7** montre un exemple des différentes étapes du traitement thermique auquel sont soumis les alliages à durcissement structural. Rappelons que l'alliage est transformé, par exemple sous forme de

tôles laminées à chaud ou à froid selon leur épaisseur ; l'ensemble est chauffé dans un four pour dissoudre les éléments d'alliage (mise en solution), puis refroidi rapidement (trempe).

Bien que l'aluminium soit un bon conducteur thermique, la trempe induit des gradients de température entre surface et cœur d'autant plus importants que les pièces sont épaisses, donc des déformations plastiques hétérogènes générant des contraintes internes qu'il va falloir résorber par une petite déformation plastique (par exemple par tractionnement des tôles). Cette étape de déformation plastique contribue aussi au durcissement de certains alliages en favorisant la décomposition ultérieure de la solution solide sur les défauts ainsi créés.

Lors du maintien à température ambiante (maturation), l'alliage trempé durcit spontanément par décomposition de

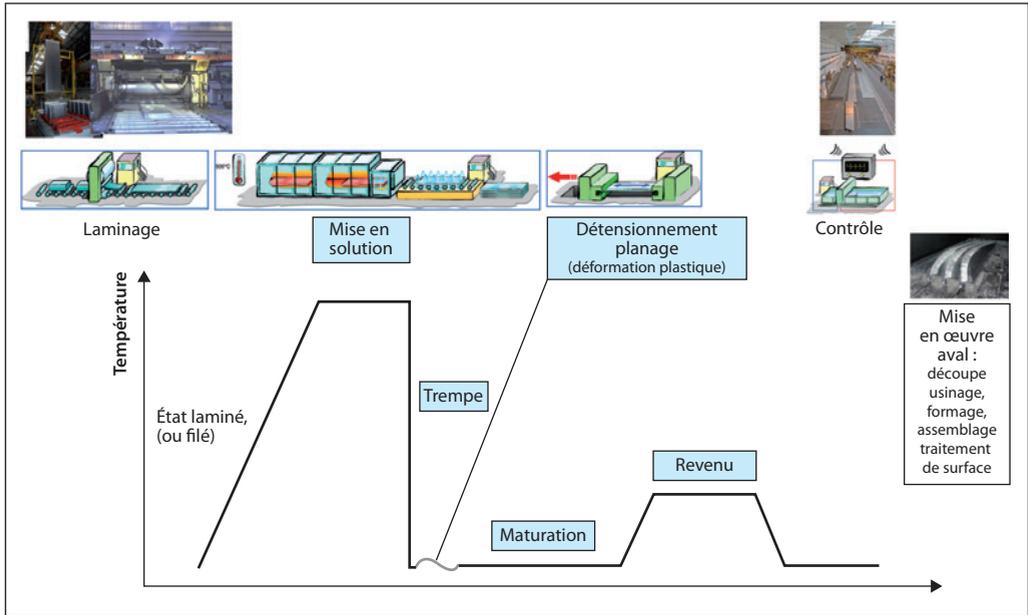


Figure 7

Les traitements thermiques des produits laminés en alliages d'aluminium à durcissement structural.

Photos : Constellium (en haut) ; démonstrateur de cadre de fuselage usiné (à droite)

la solution solide sursaturée en élément(s) d'addition (et donc métastable).

La plupart des alliages sont ensuite soumis à un traitement thermique durcissant à température modérée, typiquement 100-200 °C, appelé revenu, qui permet d'ajuster les caractéristiques mécaniques du matériau, puis on termine par le contrôle des produits.

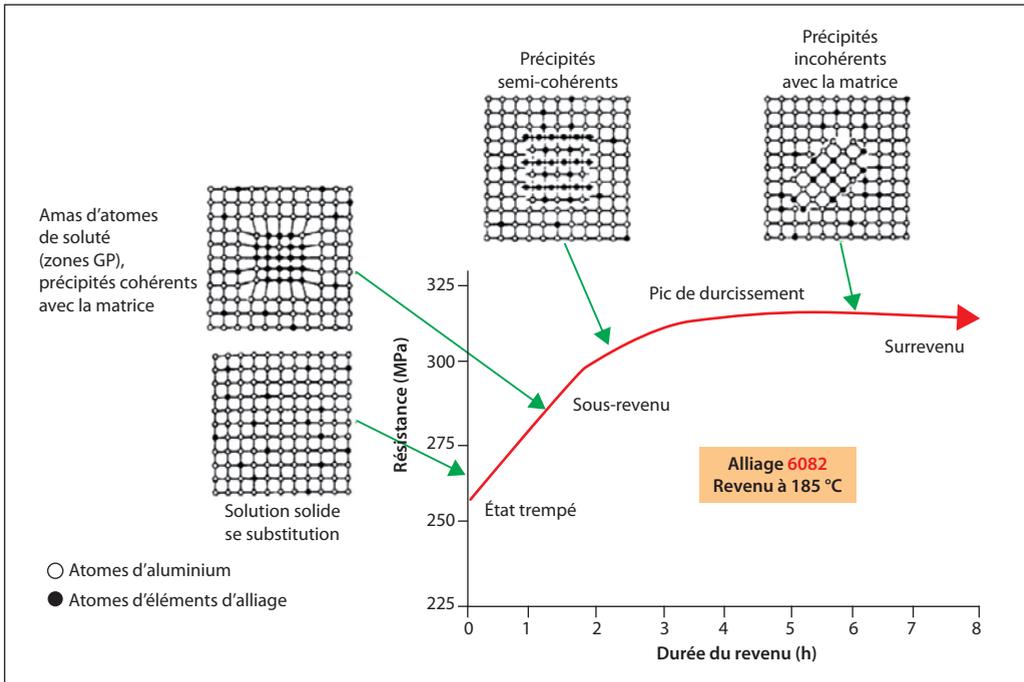
L'exemple représenté sur la **Figure 7** concerne les tôles épaisses. Pour certains panneaux de voilures d'A380, on utilise des tôles ayant jusqu'à 36 m de long, 3 m de large, et de 30 à 40 mm d'épaisseur. Le procédé de fabrication est donc très exigeant sur le plan de la qualité. Il est suivi de ce qu'on appelle la mise en œuvre en aval, réalisée par le fournisseur (découpe, pré-usinage) et/ou par client ou le sous-traitant (usinage, assemblages, traitements

de surface...). Ce schéma de traitement simplifié est appliqué, à quelques modalités et étapes près, aux tôles minces (laminées à froid) pour l'aéronautique ou l'automobile.

2.2.3. Les phases du durcissement structural lors du traitement thermique de revenu

Le revenu de l'alliage est un traitement thermique de chauffage qui fait apparaître, dans la matrice d'aluminium, des familles de précipités qui constituent des obstacles au passage des dislocations⁸ lors de la déformation plastique (**Figure 8**). C'est ce phénomène qui conduit au durcissement structural du matériau. Les alliages les plus utilisés aujourd'hui dans la carrosserie

8. Une dislocation est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline.



automobile, comme dans les structures aéronautiques, sont ceux dans lesquels les précipités sont nombreux et petits. La **Figure 8** montre l'évolution structurale des précipités et les conséquences sur le durcissement en fonction de la durée du revenu. On passe de l'état trempé, où les atomes d'éléments d'alliage sont dispersés dans la solution solide de substitution (sur les sites des atomes d'aluminium), à l'état mûri, qui provoque le rassemblement de ces atomes en amas (zones de Guinier-Preston ou zones GP) au sein de la matrice. Lors des premiers stades du traitement de revenu, la microstructure évolue pour former des précipités (phases avec une structure cristalline propre, différente de celle de la matrice d'aluminium). Ces précipités très fins sont

d'abord cohérents avec la matrice (en continuité d'interface entre précipité et matrice à une très faible distorsion élastique près). Ils croissent avec la durée et la température de revenu jusqu'à devenir semi-cohérents, puis totalement incohérents après l'atteinte du pic de durcissement. Leur nature et leur distribution régissent le durcissement de l'alliage.

2.2.4. Mécanismes du durcissement structural

Le mécanisme le plus important, dans les premiers stades du revenu, est un mécanisme de cisaillement des précipités par des lignes de dislocations qui se propagent dans des plans de glissement du réseau des atomes d'aluminium sous l'effet de la contrainte mécanique appliquée, créant ainsi de nouvelles interfaces,

Figure 8

Les stades successifs du durcissement structural lors du traitement thermique de revenu. Le durcissement est lié à la formation, lors du revenu, de fins précipités, qui constituent des obstacles au passage des dislocations (déformation plastique). Le durcissement passe par un maximum (pic) puis décroît (surrevenu).

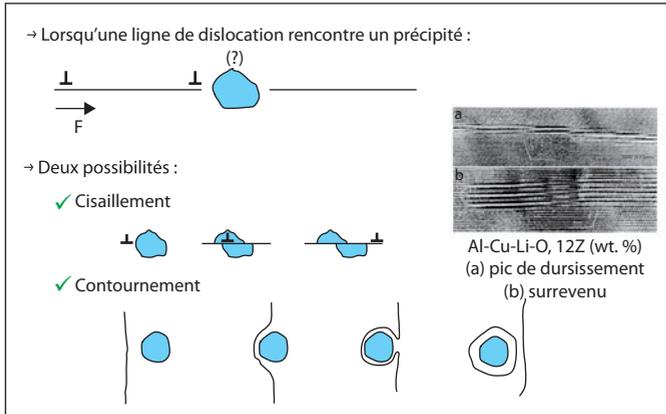


Figure 9

Influence des précipités sur le mouvement des dislocations. Photo : image de précipités fins à morphologie en plaquettes cisailés par des dislocations, observés sur la tranche en microscopie électronique à transmission à haute résolution dans un alliage Al-Cu-Li à l'état revenu.

Source : Nie et Muddle, *Mat. Sc. Eng.*, 2001

comme on le voit sur la **Figure 9**. Quand une ligne de dislocation rencontre un précipité, soit elle le cisaille (s'il est petit et cohérent ou semi-cohérent avec la matrice, à l'état sous-revenu), soit elle le contourne (s'il est suffisamment gros ou, a fortiori, incohérent avec la matrice, notamment à l'état survenu) ; dans les deux cas, ce phénomène consomme de l'énergie. Le durcissement est donc directement lié à l'énergie nécessaire pour cisailer ou contourner les obstacles. Ainsi, les paramètres importants sont la fraction volumique et la taille des précipités.

2.2.5. La structure de l'alliage : du grain à l'atome

Les fractions volumiques d'éléments ajoutés sont de l'ordre du %, et la taille des précipités est à l'échelle nanométrique. Le rôle des métallurgistes consiste à définir la composition de l'alliage et les traitements thermiques pour optimiser les propriétés mécaniques du matériau en agissant sur la microstructure.

Des exemples de microstructures d'alliages observés à différentes échelles par microscopie optique et par microscopie électronique à haute résolution sont présentés sur la **Figure 10**. La **Figure 10A** est l'image d'un alliage observé par microscopie optique en lumière polarisée. Les cristaux de la matrice d'aluminium sont visibles sous forme de grains de taille de l'ordre de la centaine de microns, de morphologie équiaxe après solidification.

Quand on augmente le grandissement, on voit apparaître, aux joints des grains ou des ex-dendrites⁹, des particules héritées de la solidification, riches en impuretés principalement de fer ou de silicium (**Figure 10B**) et de taille micronique (10 à 100 μm). Ces particules intermétalliques sont néfastes à la ductilité, à la formabilité, à la ténacité et à l'amorçage des fissures de fatigue. Le niveau de pureté du matériau de départ est donc très important.

La **Figure 10C** montre une autre classe de particules de taille nanométrique ou submicronique, appelées dispersoïdes, observées à plus fort grandissement en microscopie électronique par transmission (MET) ; elles sont riches en aluminium et en élément de transition (zirconium, chrome ou manganèse) et influencent la

⁹. Une dendrite est un cristal ramifié, en forme d'arbre ou de partie de flocon de neige, formé lors de la solidification du métal : il présente un tronc (bras primaire) avec des branches (bras secondaires) croissant dans des directions cristallographiques particulières.

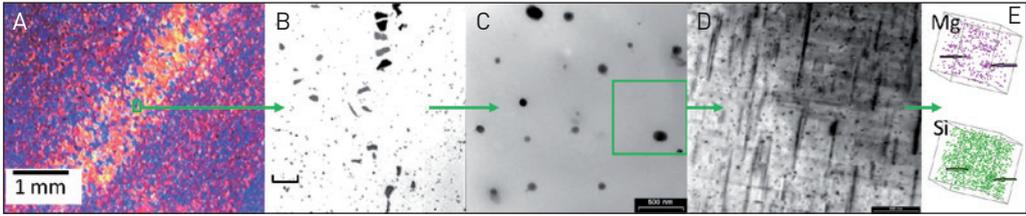


Figure 10

A) Grains : cristaux de matrice Al (structure cubique face centrée, taille $\sim 100 \mu\text{m}$) - microscopie optique ;
 B) Particules (taille $\sim 10\text{-}100 \mu\text{m}$) de phases intermétalliques riches en impuretés (Fe, Si) - microscope optique ;
 C) Particules (dispersoïdes) de composés Al+Zr, Cr ou Mn (taille $\sim 20\text{-}200 \text{nm}$, - microscopie électronique (MET) ;
 D) Précipités durcissants de phases métastables nanométriques en aiguilles (taille $\sim 2 \text{ à } 10 \text{ nm}$) - MET ;
 E) Solution solide (Al), amas d'atomes de soluté - sonde atomique tomographique.

structure granulaire, en inhibant la formation de grains nouveaux (recristallisation) lors de la transformation thermomécanique des produits. Ces dispersoïdes sont importants pour obtenir des propriétés directionnelles et agir sur l'isotropie¹⁰ et les propriétés dynamiques des matériaux.

L'observation au MET à fort grandissement de la microstructure d'un alliage aluminium-magnésium-silicium utilisé pour les structures automobiles (**Figure 10D**) montre bien les précipités de phases métastables magnésium-silicium dans la direction des axes $\langle 100 \rangle$ du cube de la matrice d'aluminium. Ce sont ces petits précipités (de l'ordre de quelques pourcents en fraction volumique, et de 10^{16} à 10^{18} cm^{-3} en densité volumique) qui constituent le renforcement à l'échelle nanométrique et induisent le durcissement de l'alliage.

La **Figure 10E** est une image tridimensionnelle à très fort

grossissement, obtenue grâce à une sonde atomique tomographique¹¹, dans laquelle on distingue la répartition des atomes de soluté dans la solution solide de substitution, avec des amas d'atomes de Mg et Si précurseurs des précipités métastables dans l'alliage.

La démarche scientifique des métallurgistes est résumée sur la **Figure 11** : elle consiste, selon le domaine d'application, à définir les propriétés visées, donc la microstructure requise, puis en déduire le choix de la composition et les procédés de fabrication.

L'exemple choisi sur la **Figure 11** est la fabrication d'alliages pour voilures. Les propriétés requises seront dans ce cas, le niveau des propriétés mécaniques, la résistance à

11. 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. Cette technique d'analyse entre dans la catégorie plus vaste des microscopes à effet de champ.

10. L'isotropie caractérise l'invariance des propriétés physiques d'un milieu en fonction de la direction.

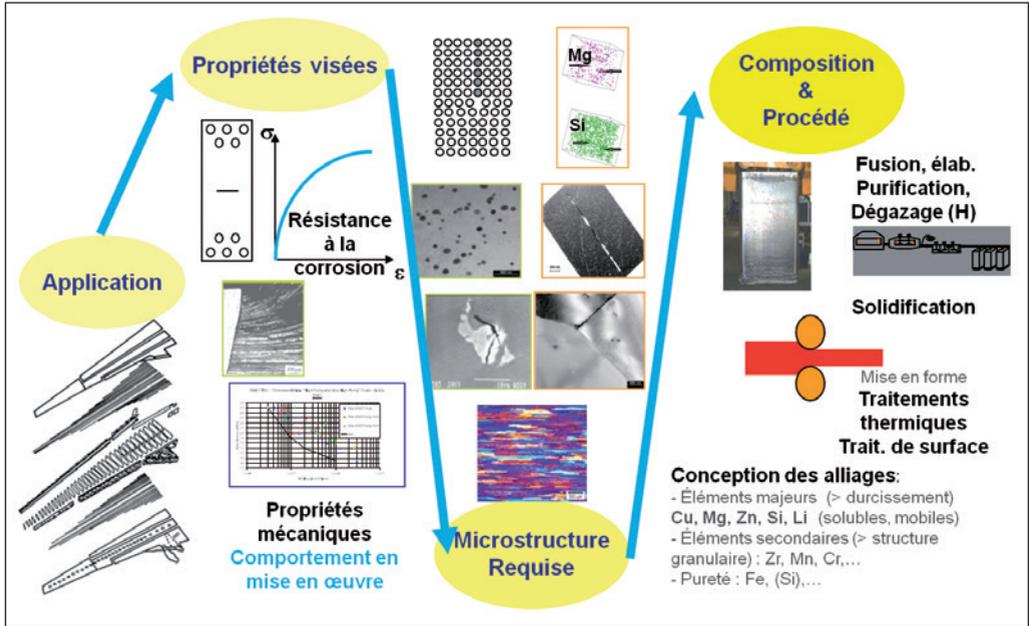


Figure 11

Conception et développement des alliages et produits : une démarche scientifique faisant appel à la chimie.

D'après Ch. Sigli, Constellium

la corrosion et le comportement attendu lors de la mise en œuvre.

À partir de cela, les métallurgistes déterminent les caractéristiques de la microstructure requise et les paramètres des traitements thermiques et thermomécaniques nécessaires pour la former. On voit sur la figure un exemple de structure à grains allongés dans le sens du laminage pour privilégier les propriétés dans le sens de la longueur du grain.

De la microstructure requise on passe à la composition. Les éléments majeurs pour le durcissement seront choisis parmi le cuivre, le magnésium, le zinc, le silicium et/ou le lithium, auxquels s'ajouteront comme éléments secondaires le zirconium, le manganèse ou le chrome pour former les particules (dispersoïdes) de la **Figure 10C** inhibant la recristallisation.

La chimie intervient à toutes les étapes de la fabrication de ces produits à hautes exigences de performances et de qualité. En amont, la fusion et l'élaboration des alliages font largement appel à la thermodynamique et à la cinétique chimiques, ainsi qu'à la chimie analytique pour la maîtrise des compositions. Elle intervient aussi au niveau du traitement de purification du métal liquide : par exemple, l'hydrogène, élément plus soluble dans le liquide que dans le solide, où il s'insère au sein du réseau de l'aluminium, ne peut être toléré qu'à une teneur de l'ordre de grandeur du dixième de ppm (1/10 ml par 100 g) sous peine de création de porosités après coulée.

Lors des traitements thermiques, il faut optimiser la microstructure et maîtriser aussi l'oxydation des matériaux, qui est particulièrement sensible quand on utilise des

éléments d'alliage comme le magnésium et, *a fortiori*, le lithium. La chimie est aussi présente dans l'ingénierie du procédé de coulée pour avoir des structures de solidification aussi homogènes que possible aux échelles macroscopique et mésoscopique (au niveau d'un ensemble de grains), ainsi que dans la conception de tous les traitements de surfaces ultérieurs en aval.

3 Les nouvelles solutions pour alléger les structures

3.1. Pour l'aéronautique

Comme on peut le voir sur le schéma très simplifié de la **Figure 12**, un avion est soumis à des sollicitations mécaniques très diverses ; il faut donc chercher des solutions multifonctionnelles pour ses matériaux constituant les différentes parties de ses structures.

Le fuselage est soumis à des sollicitations complexes quand il est en vol : il est en portance, et l'avion a tendance à fléchir ; la partie supérieure du fuselage est

donc en traction, tandis que la partie inférieure est en compression ; à chaque cycle de vol, la « peau » de l'avion se tend, puis se relaxe aussi sous l'effet des cycles de pressurisation et dépressurisation. Il en résulte de la fatigue (solllicitation mécanique alternée), des cisaillements et de la torsion des matériaux qui le composent.

En vol, la partie supérieure de l'aile (extrados) est fléchie, ce qui tend à comprimer la fibre du dessus qui devient plus courte ; en revanche, la partie inférieure (intrados) à l'opposé est mise en traction. Il en résulte des cycles de fatigue, notamment lors des différents cycles de décollage-atterrissage, mais aussi lors des sollicitations diverses en vol.

En plus de ces cycles de fatigue, il faut prendre en compte la corrosion et des sollicitations mécaniques plus complexes (tridimensionnelles) pour certaines pièces.

D'une manière générale, les exigences pour le fuselage portent donc sur la résistance mécanique et sur une tolérance aux dommages élevée qui se traduit par une haute

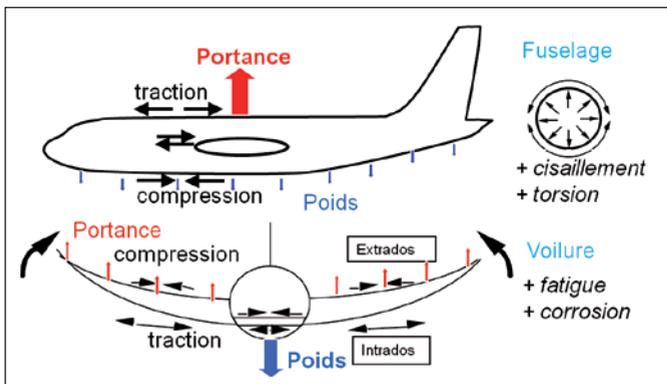


Figure 12

Schéma simplifié des sollicitations mécaniques complexes auxquelles est soumis un avion.

ténacité, c'est-à-dire une bonne résistance à la propagation brutale des fissures ou à la déchirure, et une vitesse de fissuration en fatigue aussi lente que possible.

Dans les voilures, pour les parties supérieures, on recherchera une limite d'élasticité maximale en compression et un niveau acceptable de ténacité. Pour les parties inférieures, on recherchera un compromis entre la résistance mécanique et la tolérance aux dommages car le matériau travaille beaucoup en traction, avec aussi une tenue en corrosion acceptable.

3.1.1. Les nouveaux alliages de la famille Al-Cu-Li-(Mg-Ag) pour l'allègement des aérostructures : la technologie AIRWARE®

La métallurgie des alliages et la chimie au service de la métallurgie ont permis de proposer des solutions performantes et novatrices aux avionneurs : il s'agit essentiellement des nouveaux alliages de la famille alumi-

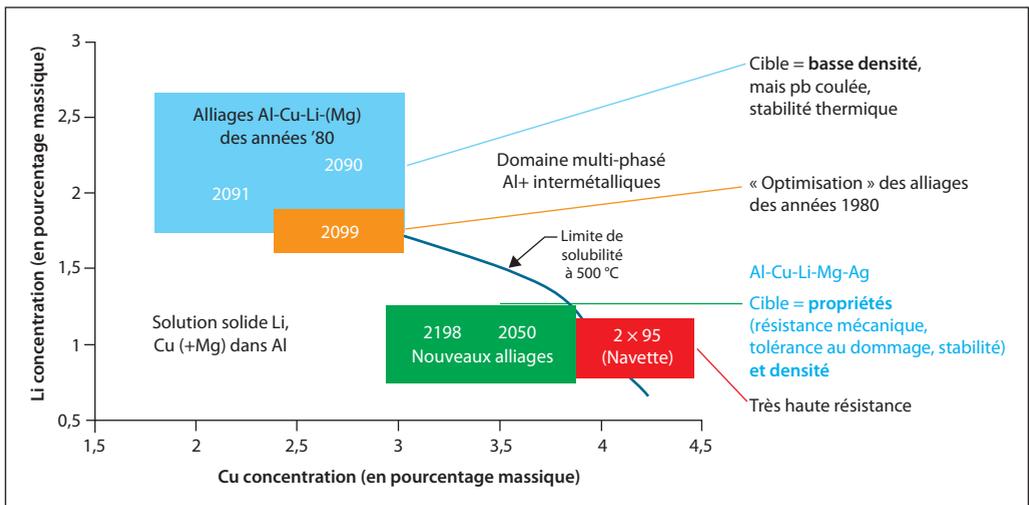
nium-cuivre-lithium, notamment ceux conçus et produits selon la « technologie AIRWARE® » de Constellium (Figure 13).

L'ajout de 1 % (en poids) de lithium (le lithium étant le métal le plus léger) réduit de 3 % la densité de l'alliage et augmente de 6 % sa rigidité (et donc le module d'élasticité des produits). Les travaux de R&D menés dans les années 80-90 avaient porté sur des alliages plus chargés en lithium à objectifs de réduction de densité de 7 à 10 %, qui avaient posé des problèmes de stabilité thermique après maintien de longue durée à température 80-100 °C, voire de ductilité et de ténacité. De nouvelles conceptions d'alliages dérivées de celles qui ont été utilisées pour le réservoir de la navette spatiale américaine ont été définies récemment pour répondre aux exigences des applications en aéronautique civile. Parmi ceux-ci, les alliages actuellement les plus représentatifs, de désignation internationale

Figure 13

Domaines de composition de nouveaux alliages de la famille Al-Cu-Li-(Mg-Ag) pour l'allègement des aérostructures.

Source : Ehrström et coll., Matériaux 2010, FFM



2198 et 2050 (selon l'Aluminium Association) sont des alliages aluminium-cuivre-lithium-magnésium-argent. On recherche à la fois une haute résistance mécanique, une haute tolérance aux dommages et une stabilité thermique, ainsi qu'une diminution de la densité de 3 à 6 %. La technologie AIRWARE® de Constellium répond actuellement à ce cahier des charges : ces nouveaux alliages, à teneur en lithium modérée (environ 1 % en poids) et plus chargés en cuivre, permettent d'avoir des solutions d'allègement tout à fait performantes. Une unité de coulée industrielle dédiée AIRWARE® a été construite en 2012 à l'usine Constellium d'Issoire. Cette technologie avancée de fusion, coulée, solidification et recyclage est spécifique du fait de l'oxydabilité et de l'affinité pour l'hydrogène des alliages au lithium à l'état liquide. Elle met en œuvre des concepts innovants en chimie des hautes températures. Elle travaille en relation étroite avec les besoins des avionneurs en exigences de qualité et de capacité. Le recyclage des chutes et copeaux d'usinage est fait selon une filière éco-efficiente.

3.1.2. Le durcissement structural des nouveaux alliages Al-Cu-Li

Ces alliages sont durcis par co-précipitation, mais l'on cherche aujourd'hui à précipiter et durcir le matériau essentiellement par des précipités d'une phase T1 de composition Al_2CuLi , qui se présente sous forme de plaquettes hexagonales croissant en orientation préférentielle sur les plans $\{111\}$ d'aluminium (**Figure 14**).

Comme cela apparaît sur l'image de microscopie électronique en transmission à haute résolution, ces plaquettes qui renforcent l'alliage à la fraction volumique de plusieurs pourcents sont très fines ; elles sont épaisses d'environ 1 nanomètre.

Deux autres types de précipités de phases métastables sont aussi susceptibles d'être présents dans ces alliages, selon leur teneur en lithium et en cuivre : la phase δ' - Al_3Li (**Figure 15**) et la phase θ' - Al_2Cu qu'on retrouve dans les alliages au cuivre (**Figure 16**). Le durcissement produit par la présence de ces phases est toutefois moindre si on le compare à celui de la phase

Figure 14

Phase T1- Al_2CuLi contribuant au durcissement structural des alliages Al-Cu-Li par co-précipitation. A) Disposition des atomes dans la phase T_1 (Al_2CuLi) ; B) images de microscopie électronique en transmission (MET) des plaquettes hexagonales sur plans $\{111\}_{Al}$; C) à plus fort grandissement (MET à haute résolution).

Source :

(A) Van Smaalen et coll., 1990 ;

(B) Decreus et coll., 2011 ;

(C) Donnadiet et coll., 2011

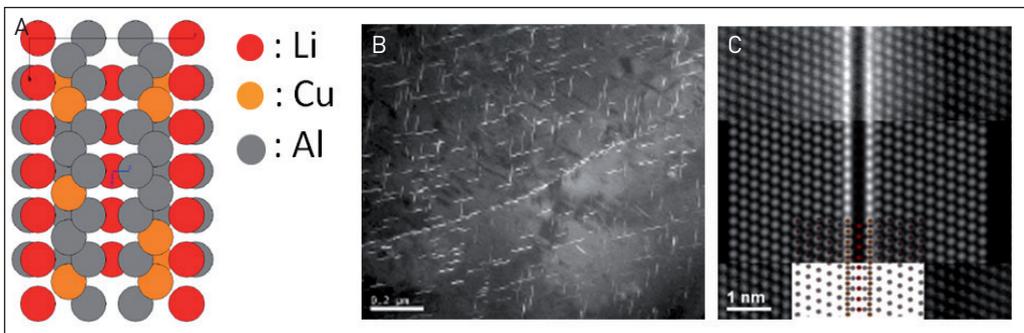


Figure 15

Phase métastable δ' - Al_3Li
de durcissement structural (faible
durcissement).

Source : Langan & Pickens,
ICAA5, 1989

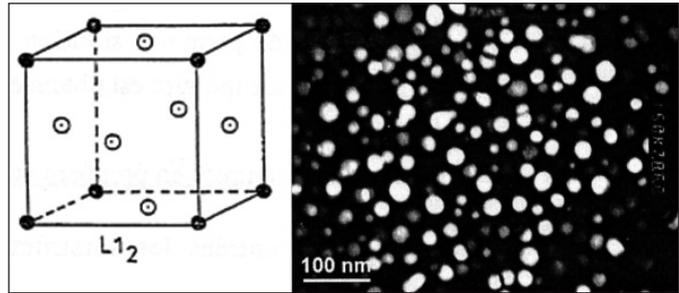
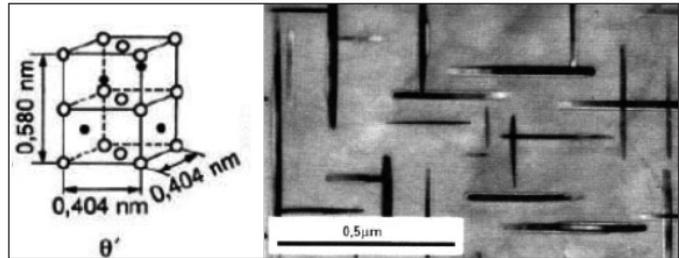


Figure 16

Phase métastable θ' - Al_2Cu
contribuant au durcissement
structural.

Source : Dubost et Sainfort,
Techniques de l'Ingénieur M 242



T1, qui confère au matériau des propriétés mécaniques de haut niveau et stables.

3.1.3. L'amélioration de la résistance à la corrosion structurale

La résistance à la corrosion structurale est une propriété importante pour le choix des matériaux exposés en service à des milieux agressifs (notamment en présence de chlorure de sodium). Dans le cas des alliages d'aluminium pour l'aéronautique, le cuivre a un rôle déterminant dans le comportement en corrosion structurale, qui est principalement régie par la corrosion intergranulaire dans le cas des alliages Al-Cu-(Li, Mg), en l'absence de contrainte appliquée ou en corrosion sous contrainte. C'est l'électrochimie qui nous permet de comprendre, avec la métallurgie physique, le mécanisme mis en jeu.

Dans un alliage contenant du cuivre placé en atmosphère ou solution corrosive, la matrice aluminium riche en cuivre en solution solide et les composés intermétalliques riches en cuivre constituent des zones cathodiques alors qu'une zone localement appauvrie en cuivre en solution solide est une zone anodique, qui sera donc un site de corrosion préférentielle. Rappelons que l'anode est la zone où a lieu une oxydation du type $\text{M} \rightarrow \text{M}^{n+} + n\text{e}^-$.

Lors de la trempe des produits en alliage d'aluminium avec une vitesse de refroidissement inférieure à une vitesse critique (notamment dans les produits épais) et lors du revenu, il se forme aux joints de grains (zone bleue sur la **Figure 17A**) des particules de précipités de la phase d'équilibre riche en cuivre qui drainent le soluté cuivre et appauvrissent donc

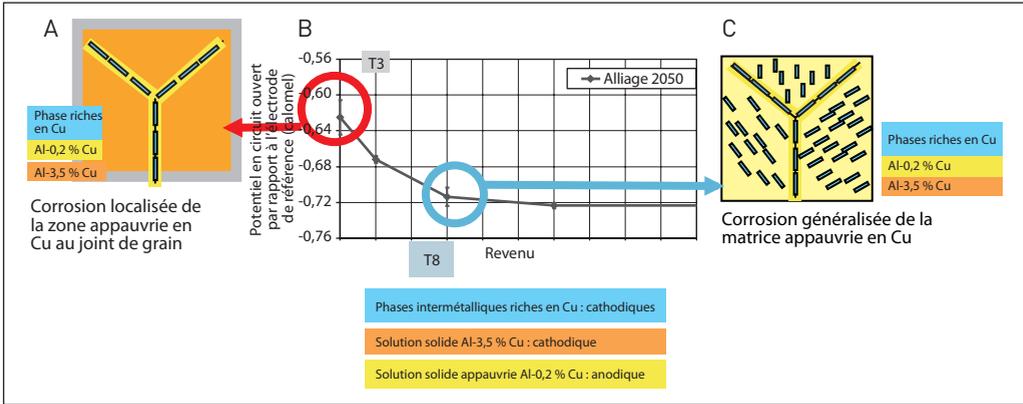


Figure 17

Évolution du potentiel en circuit ouvert avec la cinétique de revenu. La matrice aluminium est d'autant plus « noble » que sa concentration en soluté cuivre (solution solide dans l'aluminium) est élevée.

Source : Hénon, et coll., ICAA13, 2012

en soluté la zone adjacente au joint de grain (zone jaune sur la **Figure 17**). Les zones appauvries en cuivre ainsi créées vont être préférentiellement attaquées (oxydées) en milieu agressif. Le produit peut donc être sensible à la corrosion intergranulaire après trempe, écrouissage et maintien à température ambiante (état T3). Lors du traitement thermique de revenu, la matrice aluminium s'appauvrit, notamment en cuivre, au cœur des grains sous l'effet de la précipitation fine et dense des phases durcissantes. Ce traitement de revenu tend à égaliser les compositions en cuivre entre le cœur du grain et le bord du grain (zone jaune sur la **Figure 17B**) pour donner lieu à une corrosion non plus localisée et inter-granulaire, mais plutôt généralisée. Ce mécanisme explique qualitativement le bon comportement en corrosion structurale des nou-

veaux alliages AIRWARE® de la famille Al-Cu-Li traités par un revenu approprié (état T8).

3.1.4. Propriétés des nouveaux alliages

AIRWARE® 2050 a été sélectionné par Airbus pour des pièces de structure interne de l'A350 XWB pour ses propriétés mécaniques et sa tolérance aux dommages (**Figure 18**). Il est utilisé pour fabriquer des pièces

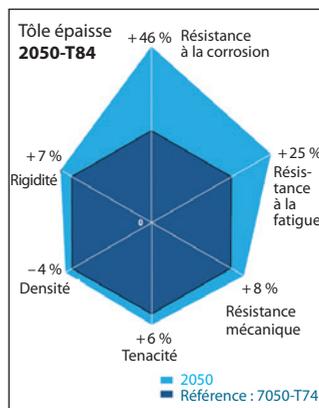


Figure 18

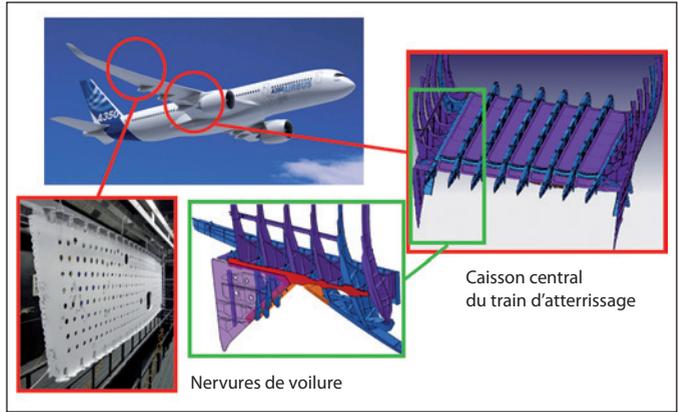
Comparaison de propriétés d'emploi des alliages des tôles épaisses en 2050 (AIRWARE®) et 7050.

Source : Constellium

Figure 19

Position des différentes pièces faisant intervenir des tôles épaisses en alliage AIRWARE® 2050 dans l'Airbus A350 XWB.

Source : Airbus



critiques usinées dans des tôles épaisses, notamment des nervures de voilure et des composants du caisson central du train d'atterrissage (Figure 19). Il est utilisé aussi pour la fabrication de pièces de forme par forgeage et matriçage.

L'ensemble des propriétés les plus importantes est amélioré par rapport celles de l'alliage de référence pour les produits épais, le 7050 traité à l'état survenu : résistance mécanique, ténacité, fatigue, densité et rigidité, corrosion.

Dans le cas des tôles minces, l'alliage AIRWARE® 2198, très tolérant aux dommages, a été choisi par Bombardier pour le fuselage du CSeries (Figure 20).

La Figure 21 montre la supériorité de cet alliage au titre de la résistance mécanique, la fatigue, la ténacité, la corrosion, la densité et la rigidité, par rapport à l'alliage de référence 2024 (à l'état mûri) utilisé depuis de nombreuses décennies.

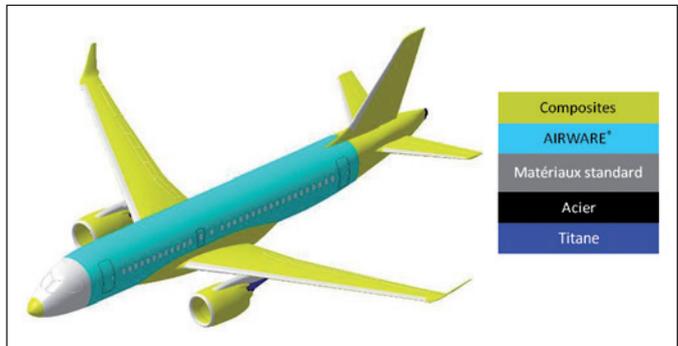
3.1.5. Optimisation, mise en œuvre et allègement des structures en aéronautique

La démarche de co-optimisation des matériaux des structures en aéronautique est de type holistique (Figure 22) et s'appuie fortement sur la chimie et la mécanique. Elle intègre en synergie les aspects matériau (métallurgie et propriétés des alliages et

Figure 20

Les différentes familles de matériaux utilisées selon les parties de l'avion Bombardier CSeries.

Source : Bombardier



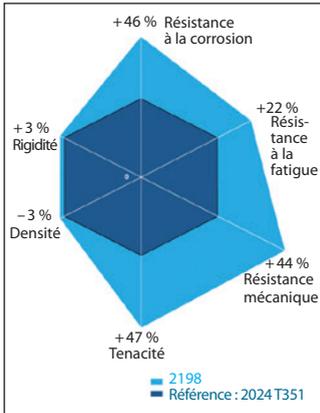


Figure 21

Comparaison des alliages Airware® 2198 et de l'alliage 2024 du fuselage (tôles minces) pour différents paramètres.

Source : Constellium

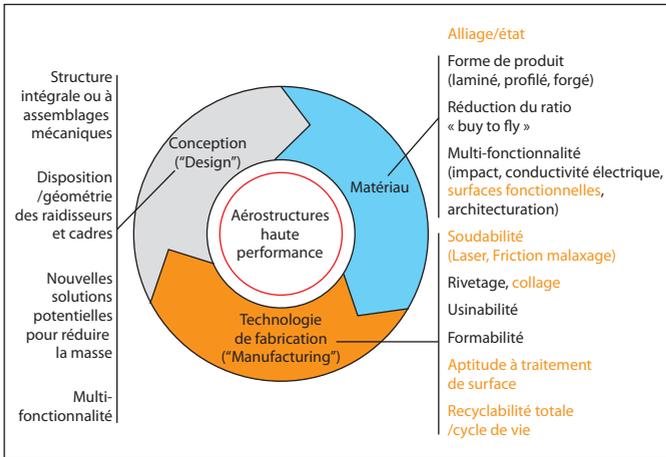


Figure 22

Démarche de co-optimisation des matériaux, des technologies de fabrication et de la conception des aérostructures à hautes performances (d'après Eberl et coll., Constellium, 2011).

produits, multifonctionnalité dont conductivité électrique, surfaces fonctionnelles), mais aussi les technologies de fabrication (assemblage, usinage, formage, traitement de surface, etc.) et de conception (« design ») des pièces.

De plus en plus de composants aluminium dans les avions sont aujourd'hui en alliages soudables, ce qui permet des allègements supplémentaires ; le collage est aussi important, d'où l'importance des traitements de surface. De plus, la recyclabilité est totale dans la même filière avec des alliages de cette nature.

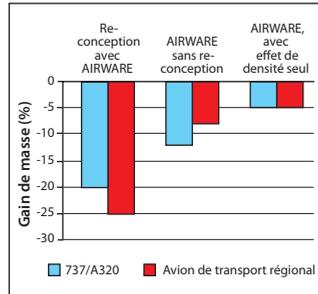
À titre d'exemple, la **Figure 23** montre le potentiel de gain de masse estimé avec l'utilisation d'un alliage à haute résistance mécanique de la technologie AIRWARE® en tirant parti de la réduction de densité des pièces, de l'amélioration des propriétés sans re-conception des pièces et d'une re-conception mécanique en synergie de performances dans les cas d'un extrados de voilure d'avion monocouloir (type 737 ou A320) et d'avion de transport régional.

La généralisation de cette approche à la famille des alliages AIRWARE® conduit à des

Figure 23

Potentiel de gain de masse estimé pour la voilure d'avions monocouloir et d'avions de transport régional par utilisation d'alliage à haute résistance mécanique de la technologie AIRWARE® en synergie avec les propriétés mécaniques et la re-conception des composants structuraux.

Source : Ehrström et coll., Constellium, Matériaux 2010, FFM



perspectives de gains de masse très attrayantes pour les solutions métalliques. De l'ajout de lithium résulte directement 3 à 6 % de gain de masse selon l'alliage. En optimisant les épaisseurs, tout en bénéficiant des propriétés mécaniques meilleures, on peut avoir 5 à 10 % de gain de masse. Si l'on reconçoit complètement les composants structuraux en prenant en compte les propriétés des nouveaux alliages et les nouvelles possibilités des technologies de mise en œuvre, on peut atteindre des gains de masse de 15 à 25 %.

3.2. Les nouvelles solutions pour l'automobile (carrosserie)

Dans le cas de l'industrie automobile, les alliages d'aluminium sont de plus en plus utilisés, notamment dans les pièces de carrosserie, pour répondre aux exigences d'allègement des véhicules *via* la substitution de l'acier par l'aluminium et l'optimisation métallurgique des produits (propriétés mécaniques-réduction d'épaisseur-conception mécanique et assemblage). Comme cela est exigé pour les matériaux métalliques (et notamment les aciers pour lesquels la problématique est similaire),

les solutions aluminium évoluent dans le sens d'une amélioration de la résistance mécanique (limite d'élasticité, en abscisse de la **Figure 24**) et de l'aptitude au formage (formabilité, en ordonnée) : en effet, plus l'alliage est dur, plus il est difficile à former (d'où le diagramme typique « en banane » de la **Figure 24**). Le haut de la **Figure 24** donne également, de manière schématique, différentes étapes-clés du procédé de fabrication des tôles de peau pour carrosserie automobile. Le traitement thermique final de cuisson de la peinture chez le constructeur contribue au durcissement structural des pièces.

Les innovations portent sur la composition des alliages et leurs états métallurgiques (structure du grain, durcissement) pour améliorer la formabilité, et si possible aussi la résistance mécanique. Elles concernent les alliages de doublure, généralement en alliages 5XXX (famille Al-Mg) à haute formabilité et résistance mécanique moyenne (tels que le 5754 et le 5182) et alliages 6XXX (famille Al-Mg-Si) à plus haute résistance mécanique, ainsi que les alliages de peau de carrosserie en alliages à durcissement structural de la famille Al-Si-Mg, à résistance mécanique intermédiaire (en particulier l'alliage 6016 de référence en Europe). Au-delà de l'amélioration des alliages actuels, l'utilisation de nouveaux alliages 6XXX et 7XXX (famille Al-Zn-Mg) plus durs pour les structures de « caisse en blanc » est un axe de développement. Cette voie peut aller de pair avec le recours au procédé de formage à tiède,

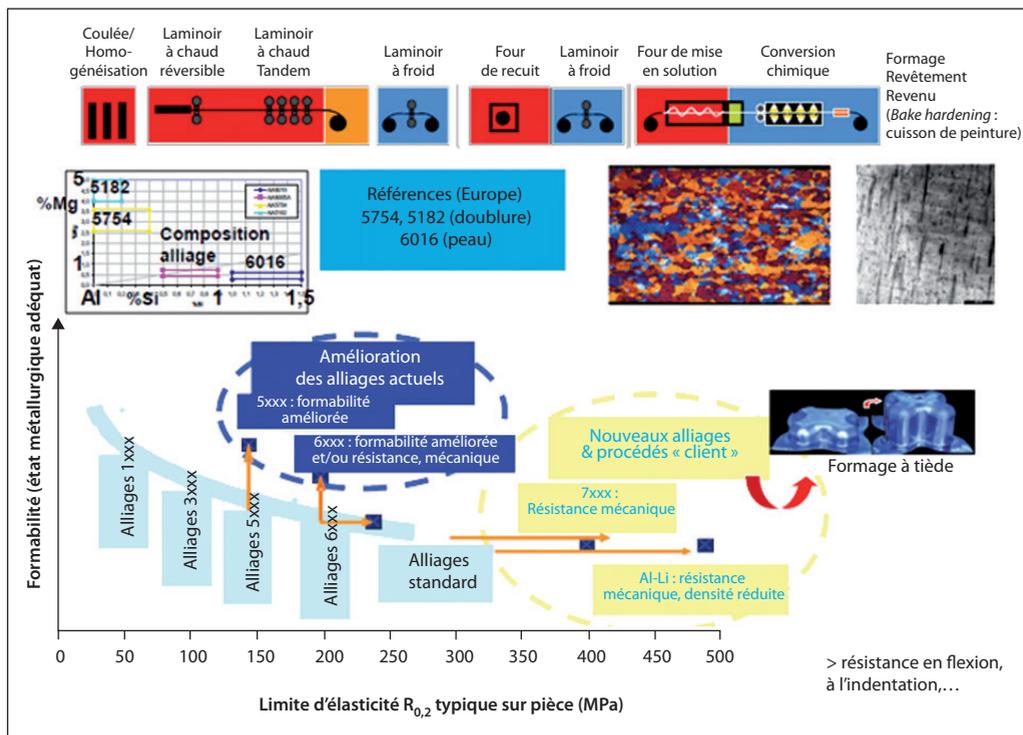


Figure 24

Tendances dans l'évolution des alliages d'aluminium pour carrosserie automobile et structure de caisse en blanc, en fonction de leur formabilité et limite d'élasticité.

Source : d'après Henry et coll., Constellium, Matériaux 2010, FFM

typiquement 200 à 300 °C, qui leur confère une formabilité très fortement améliorée. L'utilisation d'alliages à haute résistance issus de l'aéronautique (au lithium) reste limitée à certaines voitures de sport de très haut de gamme.

3.2.1. Les alliages adaptés aux exigences de formabilité

Les exigences de formabilité sont multiples comme l'illustre la **Figure 25**. Un point essentiel est l'aptitude à l'emboutissage¹² profond. Aujourd'hui, l'usage de l'aluminium s'est développé énormément dans les capots et progresse sur les portières et d'autres pièces (ailes, pavillon, structures internes). Le comportement mécanique des matériaux est une propriété du premier ordre. Il est caractérisé notamment par les courbes limites de formage (indiquant les déformations au-delà desquelles apparaissent des ruptures dans les tôles) et par l'aptitude au durcissement des alliages lors de la mise en forme des tôles (permettant d'améliorer la ductilité).

Un autre point extrêmement important est la qualité de l'aspect de surface des tôles de peau de carrosserie (**Figure 25B**). Il doit être parfait après formage et revêtement de surface. La prévention des défauts (dit de lignage) susceptibles d'apparaître du fait

12. L'emboutissage est une technique de fabrication permettant d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle plane et mince, un objet dont la forme n'est pas développable. La température de déformation se situe entre le tiers et la moitié de la température de fusion du matériau.

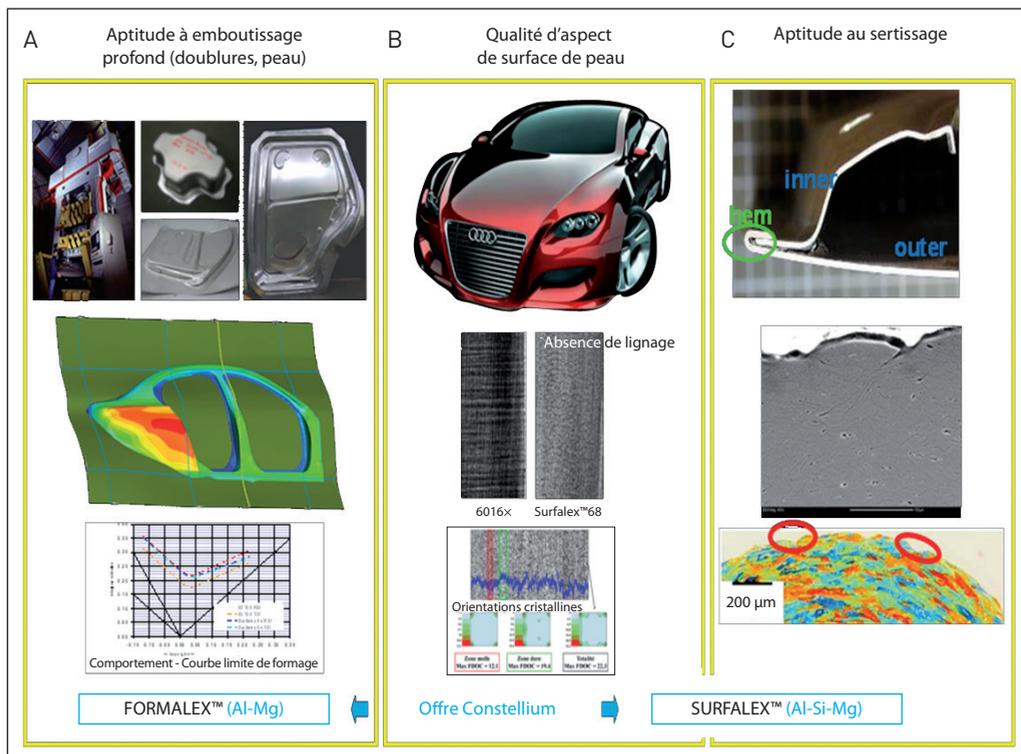


Figure 25

Exigences multiples sur la formabilité, solutions « alliages » pour carrosserie automobile.

D'après Lequeu, Constellium, RIFT 2012 et Henry *et coll.*, Matériaux 2010 ; (B, haut) : photo Audi

d'hétérogénéités de distribution d'orientation des cristaux de l'alliage lors de la mise en forme, est l'un des axes de la recherche en métallurgie des tôles de carrosserie automobile.

Une autre exigence est l'aptitude au sertissage¹³, opération qui ne doit pas faire apparaître de fissures du côté externe de la tôle sertie avec un rayon de pliage faible (**Figure 25C**). Pour cela, le métal doit être très ductile, et une fois de plus, la métallurgie agit sur les alliages, leur structure et leur durcissement.

Les nouveaux produits laminés à hautes performances

proposés par Constellium incluent notamment les marques FORMALEX® pour les tôles destinées à l'emboutissage profond (famille Al-Mg), et SURFALEX® pour les tôles de peau de carrosserie à formabilité accrue (famille Al-Mg-Si). D'autres nuances sont développées pour applications structurales dans la caisse en blanc.

3.2.2. Position des alliages d'aluminium et allègement des structures automobile

Les solutions aluminium sont compétitives en termes d'allègement par rapport aux aciers d'emboutissage laminés « conventionnels », qui constituent le matériau de référence. L'utilisation des alliages d'aluminium représente aujourd'hui le meilleur

13. Le sertissage est une opération simple d'assemblage de deux pièces où l'on procède à une déformation de la matière sans l'écraser.

rapport gain de poids/surcoût parmi les matériaux pour les carrosseries en compétition avec les aciers d'emboutissage conventionnels qui sont hautement formables (**Tableau 4**). Les alliages d'aluminium permettent ainsi des gains de masse de 30 à 50 % par rapport aux aciers d'emboutissage « conventionnels » dans les pièces de carrosserie, en premier lieu dans les ouvrants. Les capots, du fait d'un allègement relatif d'environ 40 %, représentent la première application de masse pour ces produits laminés, comme indiqué au paragraphe 1.5.

Les alliages de magnésium, plus légers, conduisent à des gains de masse potentielle-

ment plus importants, mais ils sont chers et ne sont pas faciles à fabriquer en pièces laminées et à mettre en forme, et leurs capacités industrielles de production sont limitées. De plus leur sensibilité à la corrosion impose des précautions particulières (revêtements). Ils sont donc essentiellement utilisés sur des pièces de fonderie.

Les composites à hautes performances (CFRP : fibres de carbone, matrice époxy) permettent d'atteindre des niveaux élevés de résistance au crash, résistance mécanique et rigidité mais sont réservés à des véhicules de haut de gamme car les prix restent pour l'instant excessifs pour les applications de masse.

Tableau 4

Positionnement des solutions aluminium par rapport aux autres matériaux pour pièces de structures dans l'automobile.

Source : Füller, *New developments in sheet metal forming*, Schwabenlandhall Fellbach, 2010.

Matériau	Prix typique	Gain de masse potentiel (Réf. : aciers conventionnels)	Applications	Commentaires
Aciers à très haute résistance mécanique (UHSS/AHSS)	0,8-1,5 €/kg	10-20 %	Structure principale, armatures de carrosserie, crash	Matériaux principaux pour caisse en blanc Forte activité en R&D et innovation
Alliages d'aluminium	3-5 €/kg	30-50 % (pièces de capots : -40 %)	Ouvrants carrosserie extension aux structures	
Alliages de magnésium	10-20 €/kg	40-60 %	Utilisation complexe avec revêtements	Principalement pièces de fonderie Peu se laminés
Composites CFRP (fibres de carbone)	40-80 €/kg	60-70 %	Crash ; haute résistance-rigidité	Potentiel pour le futur, mais prix doit baisser

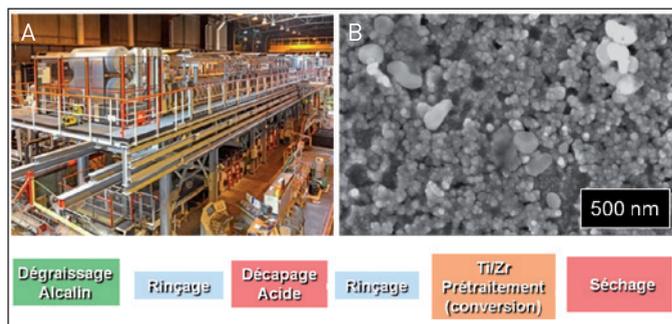


Figure 26

Procédé de prétraitement de surface sans chrome en continu (A) ; microstructure de dépôt nanométrique d'oxyde observée en microscopie électronique à balayage (B).

Source : Constellium

3.2.3. Le prétraitement de surface de bandes pour carrosserie

En aval de la métallurgie des alliages et des procédés d'élaboration et de transformation des produits, la chimie est aussi une discipline clé pour le prétraitement de surface des bandes en alliages d'aluminium, en particulier pour la carrosserie automobile (Figure 26). L'objectif est de trouver des solutions durables et performantes qui répondent

aux exigences suivantes, avec le remplacement effectif des procédés de conversion chimique à base de chromates (du fait de la toxicité du Cr VI) :

- une bonne durabilité des joints collés (performance en adhésion) ;

- une résistance à la corrosion améliorée, au niveau de celle des prétraitements de référence.

De gros efforts ont été réalisés par les chimistes pour remplacer les chromates : on utilise un procédé continu sans chrome (Figure 26) qui précipite des couches nanométriques d'oxyde de titane et/ou de zirconium en surface des tôles d'alliage.

D'autres technologies alternatives sont utilisées ; elles sont à bases de phosphate, de molécules déposées (silanes, phosphates) ou utilisent des oxydations anodiques.

La chimie, science indispensable pour l'allégement des structures aéronautiques et automobiles

Les alliages d'aluminium à hautes performances, légers par définition mais aussi recyclables, sont un levier important pour l'allégement des structures, la durabilité et l'efficacité économique des solutions matériaux dans des conceptions qui sont aujourd'hui essentiellement hybrides (associant plusieurs familles de matériaux).

Ils sont clés pour la réduction de l'empreinte environnementale dans les transports avec

un effet majeur de l'allègement dans la phase d'utilisation et l'impact du recyclage.

Pour l'aéronautique, les nouveaux alliages de la famille aluminium-cuivre-lithium, à faible densité, haute résistance mécanique et tolérance aux dommages élevée, donnent lieu aux premières applications, à l'instar de la nouvelle technologie AIRWARE® développée par Constellium, qui offre des perspectives attrayantes pour les prochaines générations d'avions.

Pour l'automobile, les progrès en métallurgie des produits laminés portent sur l'amélioration du compromis formabilité-résistance mécanique des tôles pour carrosseries, (par exemple SURFALEX® et FORMALEX® développés par Constellium). Les efforts sont poursuivis sur la recherche de nouvelles solutions pour les structures des caisses en blanc.

La chimie est clé pour la conception de nouvelles nuances et de familles d'alliages, pour la maîtrise des états métallurgiques régissant les propriétés mécaniques et le comportement en corrosion et aussi pour l'amélioration de l'éco-efficience des procédés de fabrication des produits, de la fusion aux traitements de surfaces et au recyclage.

Il faut souligner l'importance des démarches de co-développement des producteurs (métallurgistes) avec les constructeurs, qui intègrent aussi la mécanique des matériaux et des structures, de même que les progrès dans les technologies de mise en œuvre des matériaux, en particulier l'assemblage (soudage, collage).

Remerciements

L'auteur remercie ses collègues de Constellium au Centre de Recherches de Voreppe, à Issoire et à Neuf-Brisach (Christophe Sigli, Jean-Christophe Ehrström, Tim Warner, Christine Hénon, Dominique Daniel, Andreas Afseth, Sylvain Henry, Frank Eberl, Philippe Lequeu, Olivier Néel, Hervé Ribes) pour les éléments de présentations utilisés, ainsi que Mme Danièle Olivier pour sa contribution éditoriale clé dans la transcription du texte.

Quelques références

– L'aluminium - Un si léger métal, I. Grinberg, Découvertes Gallimard, 2003.

– aluMATTER : site gratuit quadrilingue de « e-learning » sur sciences et technologies de l'aluminium : <http://aluminium.matter.org.uk/>

– Techniques de l'Ingénieur M240-241-242. Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium, B. Dubost et P. Sainfort.

– La Métallurgie science et ingénierie, rapport Science et Technologie Académie des sciences et Académie des technologies, sous la direction de A. Pineau et Y. Quéré, pp. 46-54 et annexes 7 à 11, EDPsciences, 2011.

– Innovative aluminum-based solutions for aerospace applications, T. Warner, J.C. Ehrström, B. Chenal et F. Eberl, Light Metal Age, juin 2009, pp. 18-21

– Aluminium in cars-Unlocking the light-weighting potential,

Publication EAA (European Aluminium Association) 2013, http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2013/04/EAA-Aluminium-in-Cars-Unlocking-the-light-weighting-potential_2013.pdf

– Sélection des matériaux et des procédés de mise en œuvre, M. Ashby, Y. Bréchet, L. Salvo, Presses Polytechniques et Universitaires romandes, 2001.