

Les nouvelles solutions aluminium pour l'allègement des composants structuraux

Bruno Dubost

Summary	New aluminium solutions for lighter structural components Recent R and D achievements and prospects for innovative light structural applications of aluminium alloys in transportation (i.e. aerospace, automotive, marine) are outlined. The improvement of mechanical properties of the alloys is conducted in synergy with progress in their enabling technologies.
Mots-clés	Alliages d'aluminium, métallurgie, propriétés mécaniques, applications structurales, aéronautique, automobile, construction navale, assemblage, formage, conception.
Key-words	Aluminium alloys, metallurgy, mechanical properties, structural applications, aerospace, automotive, marine, joining, forming, design.

Depuis le milieu des années 90, les transports constituent le premier marché pour l'aluminium dans le monde occidental, devant l'emballage (boîitage boisson et alimentaire, feuille mince, etc.), le bâtiment et les autres domaines (électricité, mécanique, électronique, etc.). Ce développement des alliages d'aluminium corroyés (par laminage, filage ou forgeage) ou moulés dans les applications structurales est dû à leur rapport favorable entre résistance mécanique et densité relative (2,6 à 2,8), ainsi qu'à leur bonne aptitude à la mise en œuvre mécanique (formage, usinage, soudage) et au recyclage. Innovations récentes et perspectives de la R & D sont illustrées ci-après pour trois des domaines à enjeux importants (transport aéronautique, automobile, naval).

L'évolution des alliages d'aluminium pour l'allègement des structures en aéronautique

Avec l'avènement du transport de masse et les changements géopolitiques intervenus au début des années 90, l'aéronautique civile constitue l'enjeu majeur pour le développement des alliages d'aluminium à hautes performances spécifiques. Les capacités d'allègement des structures des avions (grâce à l'invention de nouveaux alliages à haute résistance mécanique et/ou à tolérance aux dommages améliorée) et la réduction des coûts de mise en œuvre des matériaux par les avionneurs sont les clés de la compétitivité des solutions aluminium pour les nouveaux avions.

Les années 70 et 80 avaient vu la compréhension de nombreux mécanismes régissant le comportement mécanique des alliages d'aluminium à durcissement structural (ténacité, fatigue, corrosion sous contrainte). Les propriétés d'emploi de nouvelles nuances d'alliages avaient été améliorées par réduction de la fraction volumique de composés intermétalliques grossiers hérités de la solidification, grâce à une base plus pure en éléments Fe et

Si néfastes à la ténacité (ex. 7475, 7050) et à l'optimisation des traitements thermiques (homogénéisation poussée et mise en solution quasi-complète des phases riches en Cu et en Si). Dans les alliages à haute résistance mécanique de la série 7XXX (famille Al-Zn-Mg-Cu), l'addition de zirconium (alliages 7X50, 7010) au lieu du chrome (alliages 7X75) dans les particules antirecristallisantes (dispersoïdes) avait augmenté la trempabilité et donc la résistance mécanique des produits épais.

Les alliages au lithium du système Al-Li-Cu-(Mg)-Zr, à densité réduite et module d'élasticité accru, objet d'une intense activité de R & D dans les années 80, n'ont pas eu le développement escompté dans l'aviation civile du monde occidental, principalement en raison des surcoûts des produits (contenant 1,9 à 2,6 % Li en poids) et d'incertitudes techniques. Les développements ont été poursuivis en Russie sur avions militaires et aux États-Unis sur alliages soudables à faible teneur en lithium (Li < 1,5 %), tels que les alliages du système Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr soudables (par ex. 2095), dont les premières applications en service ont été concrétisées en 2000 sur le lanceur de la navette spatiale. Cette famille de matériaux suscite actuellement un regain d'intérêt.

Des progrès importants ont été réalisés depuis les années 90 en métallurgie physique et mécanique des alliages d'aluminium « conventionnels » (séries 2XXX, 6XXX, 7XXX), avec le fort développement de la métallurgie modélisée [1-2]. La conception d'alliages à performances améliorées pour tôles et profilés a été rendue plus rationnelle, avec des actions sur :

- les éléments d'addition durcissants (Zn dans les alliages 7XXX après revenu, Mg et Cu),
- les dispersoïdes (notamment Al_3Zr), influant sur l'anisotropie des propriétés mécaniques et la fissuration en fatigue des alliages par action sur la structure granulaire fibrée ou la sous-structure,
- les traitements thermiques (mise en solution, revenus multi-paliers), optimisant les compromis entre limite

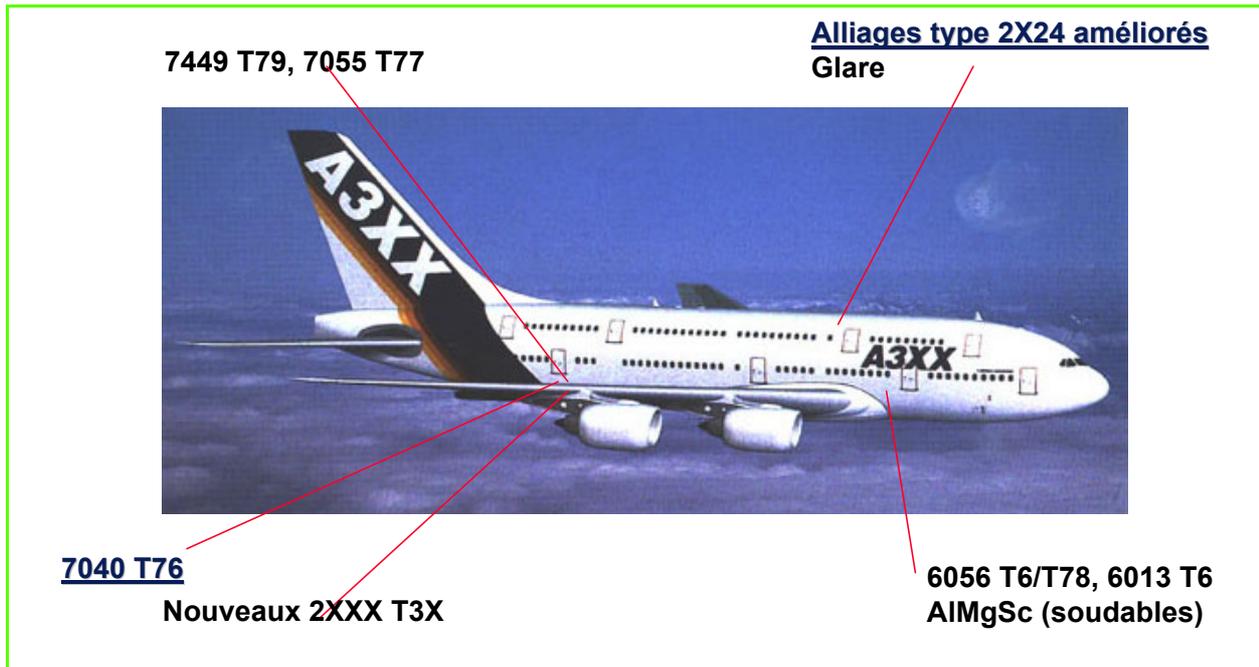


Figure 1 - Les nouveaux alliages d'aluminium structuraux considérés pour l'Airbus A380 (d'après J. Hinrichsen, AAAF, 1999).

Tableau I - Composition des nouveaux alliages d'aluminium à haute résistance enregistrés à l'Aluminium Association et proposés par Pechiney pour extradados de voilure (7449, 7349) et tôles très épaisses destinées à l'usinage de longerons et nervures (7040) et des alliages 7150, 7050, 7010 de référence (d'après [3]).

Alliage	Si	Fe	Mg	Cu	Zn	Cr	Zr	Ti
AA7150	0,12	0,15	2,0-2,7	1,9-2,5	5,9-6,9	0,04	0,06-0,15	0,06
AA7449	0,12	0,15	1,8-2,7	1,4-2,1	7,5-8,7	0,05	Ti + Zr : 0,25	
AA7349	0,12	0,15	1,8-2,7	1,4-2,1	7,5-8,7	0,10-0,22	Ti + Zr : 0,25	
AA7050	0,12	0,15	1,9-2,6	2,0-2,6	5,7-6,7		0,06-0,15	
AA7010	0,12	0,15	2,1-2,6	1,5-2,0	5,7-6,7		0,10-0,16	
AA7040	0,10	0,13	1,7-2,4	1,5-2,3	5,7-6,7		0,05-0,12	

d'élasticité, résistance à la corrosion feuilletante ou sous contrainte et ténacité.

Les choix des matériaux sur avions récents (Airbus A340-500/600, Boeing 777) et futurs, comme l'A380 (figure 1), donnent une part importante aux nouvelles solutions aluminium [3-4] et s'appuient sur une intégration plus forte entre métallurgistes, mécaniciens de la rupture et concepteurs [4-5].

Sur produits épais, les nouveaux alliages durs à haute teneur en zinc, de désignations 7449 (tôles) et 7379 (profilés) développés par Pechiney (tableau I) et 7055, développé par Alcoa [4], sont considérés pour les extradados de voilure de l'A380 sollicités principalement en compression (figure 2), en remplacement du 7150. Les pièces de structure intégrales (longerons, nervures) usinées à partir de tôles très épaisses (150 à 200 mm) prennent une part croissante. Le nouvel alliage 7040, défini par Pechiney selon une approche de modélisation métallurgique [1], offre un compromis de propriétés (résistance mécanique, ténacité) améliorées par rapport aux alliages 7050 et 7010 après trempe lente et survenu (figure 3). Pour les revêtements d'intradados de voilure, sollicités en fatigue, les avionneurs s'orientent vers de nouveaux alliages (IS 262 de Pechiney, 2026 d'Alcoa), mis en œuvre à l'état trempé-(écroui)-mûri. Leur ténacité et

leur comportement en fatigue sont améliorés par rapport à l'alliage de référence 2024 (Al-Cu-Mg-Mn), dont ils constituent des évolutions. La résistance à la fissuration en fatigue sous spectre de charge, dont la connaissance des mécanismes est critique, demeure toutefois un facteur limitant pour leur dimensionnement. Enfin, les perspectives

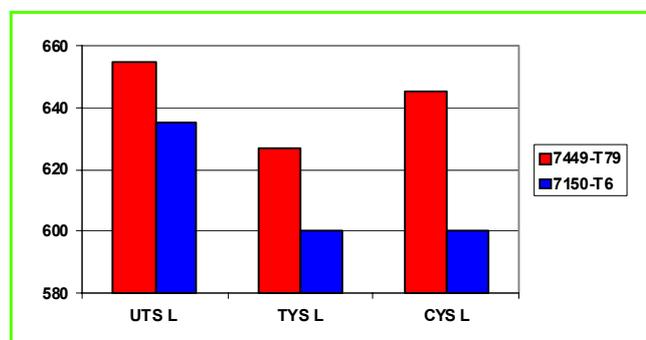


Figure 2 - Caractéristiques mécaniques comparées (en MPa) du nouvel alliage 7449 pour extradados de voilures et de l'alliage de référence 7150, d'après [3] (UTS : charge de rupture en traction, TYS : limite d'élasticité en traction, CYS : limite d'élasticité en compression).

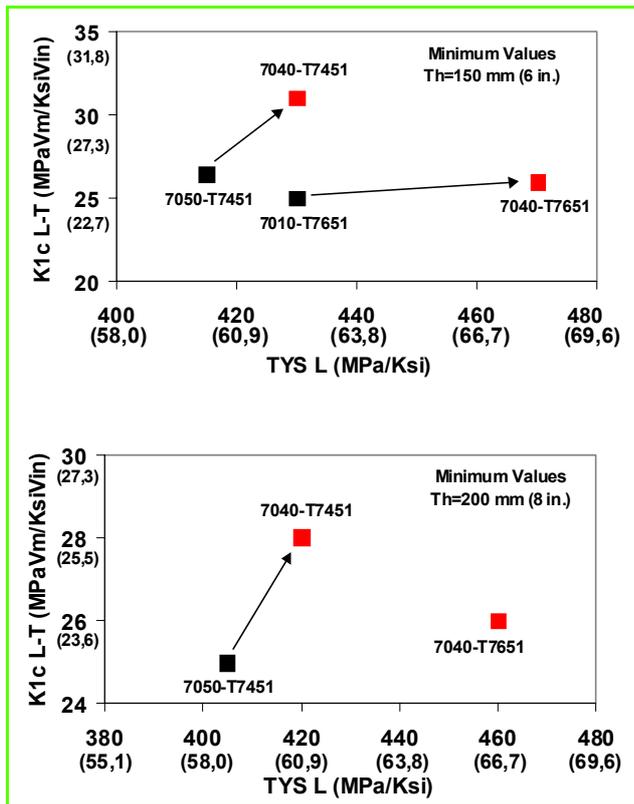


Figure 3 - Compromis de propriétés mécaniques comparées (ténacité-limite d'élasticité) du nouvel alliage 7040 et des alliages de référence pour tôles épaisses (150 et 200 mm) de structures aéronautiques destinées à l'usinage profond (d'après [3]).

offertes par le soudage par friction à l'état solide (FSW : « friction stir welding »), inventé au TWI (The Welding Institute) [6], sont attrayantes, dans la mesure où il sera possible d'assembler des demi-produits longs et/ou épais en alliages durs non soudables par fusion. Les premières applications sont attendues sur parties soumises à des sollicitations statiques.

Dans le domaine des tôles minces et moyennes pour fuselage, l'alliage 2024 plaqué, utilisé à l'état T3 ou T4, a eu sa tolérance au dommage améliorée par ajustement de compositions (nouvelles nuances dont le 2524) et de traitements thermiques [3-4]. Le soudage laser, grâce aux nouvelles sources YAG (Yttrium Aluminium Garnet) avec faisceau guidé par fibre optique, offre une perspective d'allègement par rapport au rivetage, du fait de propriétés mécaniques plus élevées des joints soudés et zones affectées thermiquement (plus étroits) après soudage et/ou traitement thermique. Les alliages soudables de la série 6XXX dans la famille Al-Mg-Si-Cu-Mn-(Zr), à compromis adaptés de résistance mécanique, tolérance au dommage, comportement en fatigue et en corrosion (6056 dans différents états (figure 4) et 6013), sont en lice pour des parties basses du fuselage de l'A380.

Dans le domaine de la réduction des coûts de mise en œuvre, la minimisation des contraintes résiduelles après trempe et traction contrôlée des tôles avec l'appui de la simulation numérique thermomécanique [7] permet d'optimiser la stabilité dimensionnelle à l'usinage des pièces de structure par l'avionneur [3]. L'intégration du pré-usinage et la découpe avec recyclage interne des déchets chez le producteur de demi-produits, l'amélioration de la formabilité

des tôles minces et moyennes en 2024 (possible à l'état mûri), et l'aptitude au formage au revenu (à température modérée) de certains alliages, sont d'autres réponses de Pechiney aux attentes des avionneurs. Quant aux pièces moulées en alliages hypoeutectiques (Al-Si-Mg), elles sont appelées à des applications nouvelles sur pièces de géométries complexes et parois minces (ex. les portes). En définitive, les alliages d'aluminium à durcissement structural conservent une part prépondérante (60 à 70 %) dans les structures des avions de génération récente (ex. Airbus A340-500/600) ou nouvelle (Boeing 777, A380). Leurs propriétés spécifiques sont encore susceptibles d'être améliorées par ajustement des compositions en éléments d'addition majeurs et dispersoïdes (ex. le scandium) et des traitements thermiques ou thermomécaniques. Les composites à fibres de carbone et/ou aramide et matrice thermosoudable (résine époxy) ont atteint un palier à 15 à 20 % de la masse des structures de ces avions civils à la fin des années 2000. Le Glare™, complexe multicouche mince, constitué d'alliage d'aluminium type 2024 et de composite fibres de verre/résine époxy, est une réponse possible pour les pièces très sollicitées en fissuration en fatigue. Une application est envisagée sur la partie supérieure du fuselage de l'A380.

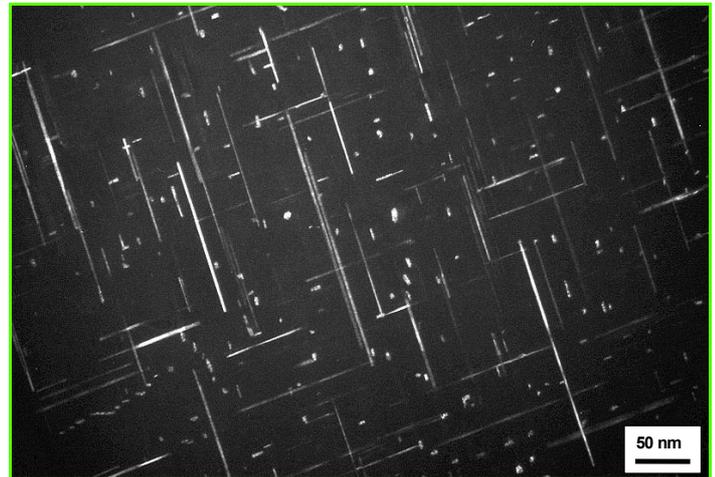


Figure 4 - Image en microscopie électronique en transmission (fond noir) de la précipitation durcissante (aiguilles et lattes de phases métastables orientées suivant $\langle 100 \rangle_{Al}$) dans l'alliage de fuselage 6056 (Al-Mg-Si-Cu-Mn-Zr) à l'état survenu T78 (cliché : M. Tanaka, Pechiney CRV).

Le développement des alliages d'aluminium structuraux dans l'automobile

L'automobile est le marché qui présente un fort taux de croissance prévisionnelle pour les alliages d'aluminium (6 % par an), compte tenu des réductions impératives de la masse des véhicules en raison d'exigences toujours plus fortes de confort et de sécurité de la part des utilisateurs et des contraintes environnementales sévères : la réduction de consommation est de 0,6 L/100 km par allègement de 100 kg de la masse d'un véhicule et l'allègement des solutions aluminium par rapport à l'acier est actuellement de 40 à 50 %. Or, la limitation des effluents gazeux en Europe, respectivement à 140 et 120 g CO₂/km en 2008 et en 2012, devra abaisser la consommation moyenne de carburant au niveau de 5,6 L/100 km en 2008 et 4,8 L/100 km en 2012, au

lieu de 7 L/ km en moyenne en 2000. De plus, les exigences en matière de taux de recyclage des véhicules hors d'usage (85 % de leur masse en 2006 et 95 % en 2015, contre 75 % en 2000), et la prise en charge de leur coût économique par les constructeurs sont des atouts importants pour une utilisation accrue de l'aluminium qui représente actuellement 50 % de la valeur des produits récupérables dans un véhicule usagé. La masse moyenne d'aluminium par véhicule, actuellement de 85 kg (8 %) en Europe, devrait ainsi atteindre 125 kg (soit 12,5 %) à l'horizon 2005.

Cette croissance sera essentiellement due aux nouvelles applications structurales des alliages d'aluminium (laminés, profilés, moulés, moulés-matricés), d'abord dans les superstructures et ouvrants (capots, portières, hayons) et, à moyen terme, dans les liaisons au sol. Les pièces moulées (principalement en alliages au silicium hypoeutectiques Al-Si-Mg modifiés et Al-Si-Cu-Mg) continueront à constituer l'essentiel des autres applications (6 à 7 % de la masse moyenne, principalement dans le groupe motopropulseur) avec les alliages pour échangeurs thermiques.

Dans le domaine des superstructures allégées, le concept de « cage à oiseaux » associant profilés en alliages 6XXX (famille Al-Mg-Si) et nœuds moulés en alliages d'aluminium, développé par Audi d'abord en haut de gamme sur l'A8 avec Alcoa au début des années 90 puis sur l'A2 avec Alusuisse/Alcan (figure 5), pourrait se décliner sur la future A6 vers 2005. Le développement de superstructures en alliages d'aluminium pour caisses autoportées a été très important aux États-Unis, compte tenu de perspectives d'allègement encore plus fortes qu'en Europe. Le développement de véhicules de grande série intégrant des pièces aluminium embouties dans les ouvrants s'est accéléré auprès des constructeurs français depuis 2001, grâce à la mise au point par Pechiney [8] de nuances d'alliages 6016 à formabilité à l'emboutissage et résistance mécanique à l'indentation améliorées pour peau de carrosserie (figure 6), associés à des alliages de renfort intérieur en alliages 5XXX (famille

Al-Mg). Leurs applications sur modèles récents (Peugeot 607 et 307, Renault Laguna II, Citroën C5) bénéficient des progrès réalisés dans la maîtrise de l'aptitude à la découpe et des états de surface (aspect, résistance à la corrosion filiforme) [9].

L'amélioration future des combinaisons entre propriétés mécaniques et formabilité reposera sur la maîtrise quantitative des microstructures (particules intermétalliques grossières, précipitation durcissante fine dans les alliages de série 6XXX) dans divers états métallurgiques (gamme de fabrication thermomécaniques et traitements thermiques finals). La modélisation métallurgique des transformations de phases permet d'ores et déjà de réduire les dispersions et propriétés des produits filés et de proposer des nuances d'alliages (du 6060 au 6082) adaptées aux besoins des producteurs de profilés et de leurs clients [10]. La maîtrise géométrique et métallurgique des procédés de formage (ex. emboutissage des tôles, cintrage des profilés) et d'assemblage (soudage à l'arc, laser, collage, etc.) mobilise producteurs, constructeurs et centres techniques ou laboratoires publics européens, nord-américains et asiatiques dans des actions de recherche technologique à fort enjeu : conception intégrée des outillages d'emboutissage, soudage et emboutissage de flans rabotés d'épaisseurs hétérogènes, assemblage de produits mixtes (moulés/corroyés) ou hybrides (multi-matériaux).

La nouvelle étape de l'allègement des véhicules concerne les éléments de structures soumis à des sollicitations dynamiques (crash) et les liaisons au sol [11] constituées de sous-ensembles assemblés (principalement par soudage) en alliages d'aluminium moulés et corroyés (laminés, filés/profilés, forgés) à hautes exigences en fatigue (figure 7). Les alliages de moulage ductiles coulés sous pression, avec mise sous vide préliminaire, permettent la réalisation de pièces à parois minces à propriétés d'emploi et coûts de mise en œuvre améliorés. Les caractéristiques mécaniques en fatigue et au crash de ces éléments de structures sont

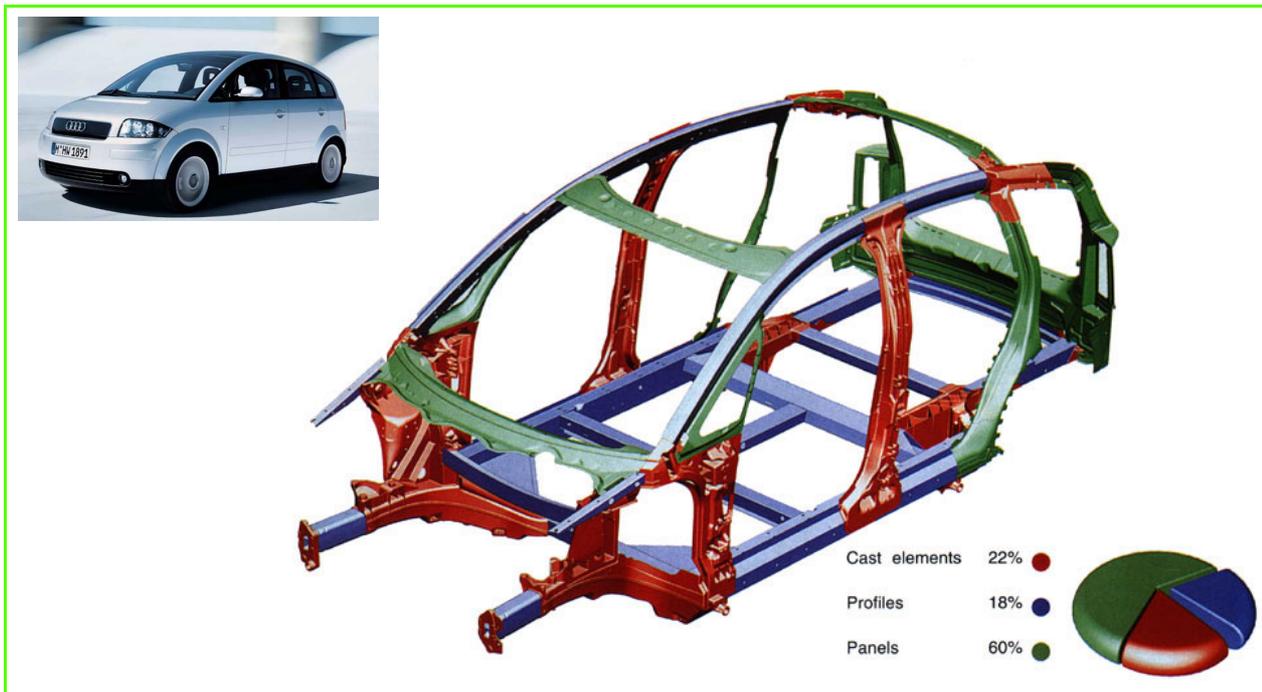


Figure 5 - Le concept de structure légère de type « cage à oiseaux » de l'Audi A2 associant produits filés, moulés et laminés en alliages d'aluminium (document Audi).

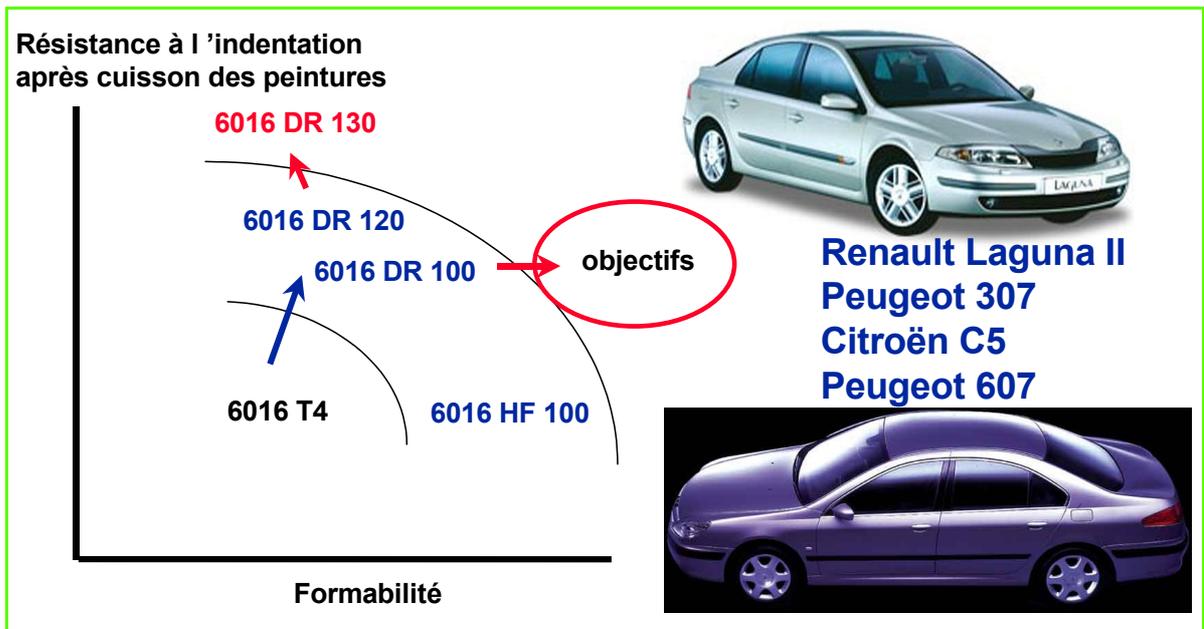


Figure 6 - Démarche d'amélioration des compromis entre formabilité à l'emboutissage et résistance mécanique à l'indentation (après revenu de cuisson des vernis) des nouvelles nuances de tôles alliage 6016 pour peau de carrosserie développées par Pechiney et applications sur ouvrants [9].

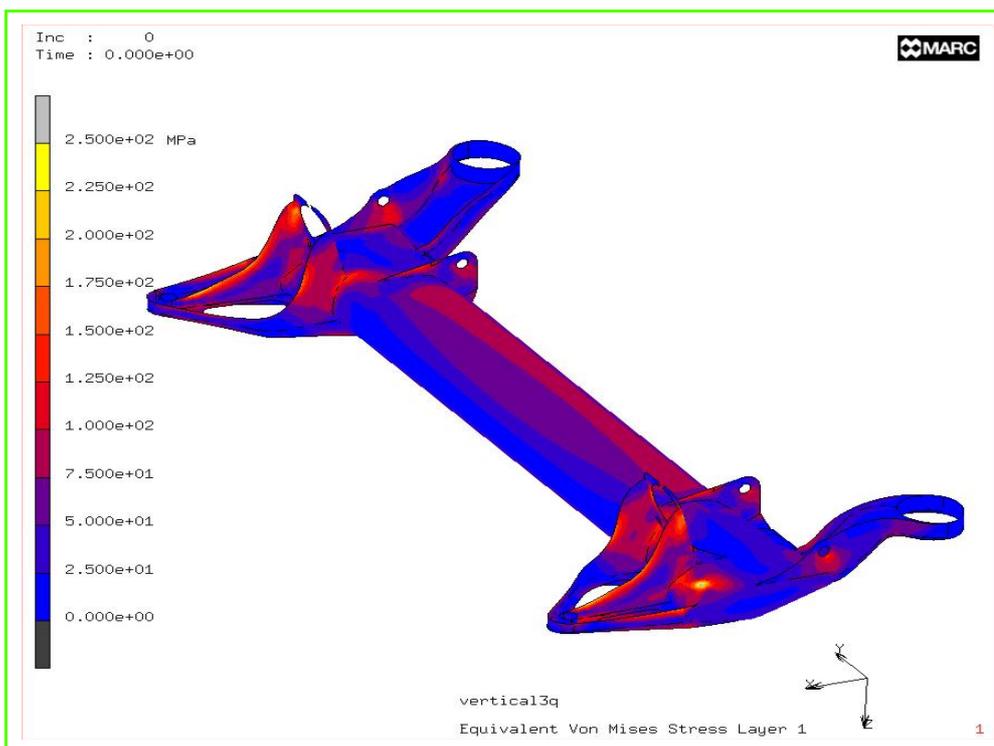


Figure 7 - Exemple de calcul par éléments finis (contrainte équivalente au sens de Von Mises) sur la traverse arrière de la Citroën C5, constituée de deux bras moulés en alliage Pechiney Calypso 67B (AS7G0.3) et d'un profilé central en alliage 6005A (Pechiney Softal), soudé à l'arc (MIG robotisé) : le gain de masse est de 45% par rapport à une solution fonte + acier (d'après [11]).

régies par les paramètres de la solidification, des traitements thermiques et du soudage (arc, laser). La méthode du « point chaud » constitue un progrès pour le dimensionnement en fatigue des structures légères soudées [12]. Le comportement au crash est une caractéristique critique pour la conception optimale. Sa modélisation numérique est réalisable dans la phase d'absorption d'énergie, mais la

définition d'un critère de rupture au crash adapté aux alliages légers sera une avancée décisive.

Les nouveaux alliages d'aluminium soudables pour l'allègement des navires rapides

Grâce à leur légèreté, leur bonne résistance à la corrosion en milieu marin et leur excellente soudabilité à l'arc, les alliages d'aluminium 5XXX de la famille Al-Mg-Mn (*tableau II*) occupent une position de premier choix dans la construction navale, en particulier pour la réalisation de navires à grande vitesse (*figure 8*) à partir de tôles épaisses livrées à l'état recuit et de profilés. Le durcissement est régi par la composition de la solution solide (teneur en Mg, Mn), la finesse du grain de coulée et la sous-structure fibrée. La fin des années 90 a conduit au développement par Pechiney de l'alliage 5383, évolution de l'alliage de référence 5083 à teneur accrue en dispersoïdes riches en Mn, et par Hoogovens (Corus) du 5059,

plus chargé. Une nouvelle nuance d'alliage 5383, enrichie en éléments Mg, Mn et Zr et à teneur réduite en Cr et Cu par rapport au 5383 classique, est proposée par Pechiney avec une limite d'élasticité du joint soudé accrue de 25 à 30 % et une bonne résistance à la corrosion [13]. Les progrès dans le dimensionnement en fatigue des structures soudées sont décisifs pour l'extension de l'utilisation de ces matériaux.

Tableau II - Composition des alliages soudables enregistrés à l'Aluminium Association (5083, 5383, 5059) et de la nouvelle nuance de 5383 (NG) proposée par Pechiney pour le marché de la construction navale, en particulier pour les navires à grande vitesse (d'après [12]).

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
AA5083	0,40	0,40	0,10	0,4 1,0	4,0 4,9	0,05 0,25	0,25	0,15	
AA5383	0,25	0,25	0,20	0,7 1,0	4,0 5,2	0,25	0,40	0,15	0,20
5383NG proposé	0,25	0,25	0,10	0,8 1,1	4,3 5,3	0,15	0,40	0,15	0,05 0,20
AA5059	0,45	0,50	0,26	0,6 1,2	5,0 6,0	0,25	0,40 0,9	0,20	0,05 0,25

utiles pour lever plusieurs verrous scientifiques (ex. précipitation métastable, fissuration en fatigue, rupture en crash). En aval, une intégration forte entre équipes pluridisciplinaires de métallurgistes, mécaniciens des matériaux, concepteurs et technologues de la mise en œuvre (en particulier dans les nouvelles techniques d'assemblage) devrait permettre l'émergence de solutions innovantes d'allègement dans des délais plus courts que ceux des démarches de R & D métallurgique des dernières décennies du XX^e siècle.



Figure 8 - Navire rapide de 101 mètres type auto Express (Pacifica d'Euroferry) construit par Austal avec structure légère en alliage d'aluminium (d'après [12]).

Conclusion et perspectives

L'amélioration des performances des solutions aluminium pour applications structurales est un objectif permanent dans les transports, ce dont témoignent leurs exemples de développement dans les nouvelles générations d'avions civils, d'automobiles et de navires à grande vitesse. En amont, elle s'appuie davantage sur la modélisation métallurgique à différentes échelles (de l'agrégat d'atomes au polycristal) et sur la maîtrise quantitative des microstructures héritées de la solidification, de la mise en forme, des traitements thermiques et du soudage des matériaux. Les avancées des méthodes de caractérisation fine, de modélisation physique et de simulation numérique couplées seront

Références

- [1] Shahani R., Warner T., Sigli C., Lassince P., Lequeu P., *Aluminum Alloys, Proc. ICAA6, JILM, 1998*, 2, p. 1105.
- [2] Deschamps D., Dumont D., Bréchet Y., Sigli C., Dubost B., *Proc. Conf. ASM Materials Solutions, Indianapolis, 2001*.
- [3] Lequeu P., Lassince P., Warner T., Raynaud G.M., *Int. J. of Aircraft Eng. & Aerosp. Techn.*, **2001**, 73, p. 2.
- [4] Liu J., Kulak M., *Proc. ICAA7, Mater. Sc. Forum, 2000*, 331-337, p. 140.
- [5] Ehrström J.-C., Warner T., *Proc. ICAA7, Mater. Sc. Forum, 2000*, 331-337, p. 5.
- [6] Nicholas E.D., *Aluminum Alloys, Proc. ICAA6, JILM, 1998*, 2, p. 139.
- [7] Heymès F., Commet B., Dubost B., Lassince P., Lequeu P., Raynaud G.M., *1st Int. Non Ferrous Processing and Techn. Conf.*, St Louis, Missouri, **1997**.
- [8] Daniel D., Shahani R., Baldo R., Hoffmann J.-L., *Proc. IBEC, Detroit, 1999*.
- [9] Daniel D., Baldo R., Sommer J., Finkbeiner A., *Conf. Aluform, Paris, janvier 2002*.
- [10] Shahani R., Tirard-Collet R., Sigli C., *Proc. 7th Aluminum Extrusion Technology Seminar*, Aluminum Extruders Council and Aluminum Association, **2000**, vol. 2, p. 13.
- [11] Parant O., Bouet-Griffon M., *Conf. Aluform, Paris, janvier 2002*.
- [12] Bouet-Griffon M., Ehrström J.-C., Courbière M., Thomas J.-J., Puchois J.-P., Rathery S., Liénard C., *Conf. Inalco, 2001*.
- [13] Duran A., Dif R., *Conf. FAST, Southampton, 2001*.



Bruno Dubost

est Directeur scientifique de Pechiney Centre de Recherches de Voreppe*.

* Pechiney Centre de Recherches de Voreppe, 725 rue Aristide Bergès, BP 27, 38341 Voreppe Cedex.
Tél. : 04 76 57 83 04. Fax : 04 76 50 12 71.
E-mail : Bruno.Dubost@pechiney.com