

Alliages et procédés de mise en forme étudiés

I.1 Introduction

Cette étude s'intéresse à la mise en forme d'alliages d'aluminium basse densité pour des applications aéronautiques. Deux alliages légers fournis par CONSTELLIUM, sont considérés : un matériau déjà commercialisé et un autre en cours de développement correspondant, respectivement aux références 2050 et AW551. Deux procédés de mise en forme sont envisagés : l'emboutissage poinçon/matrice à haute température (*Hot Forming*) ainsi que la mise en forme par fluage (*Creep Forming*).

Dans ce chapitre, sont présentés d'une part, les principales caractéristiques des alliages étudiés (composition chimique, microstructure, caractéristiques thermiques et mécaniques), et d'autre part les principes de chaque procédé de mise en forme (tout en soulignant leurs avantages et inconvénients). Le panneau de fuselage qui sert de cas type à cette étude est ensuite présenté, en termes de fonctions, de formes génériques et de conditions thermomécaniques de formage.

I.2 Les matériaux étudiés

I.2.1 L'alliage d'aluminium 2050

L'alliage 2050 est un alliage léger à basse densité de la famille des Aluminium-Cuivre-Lithium. Sa composition chimique est donnée dans le Tableau I-1. Ses applications actuelles concernent essentiellement le domaine aéronautique. De par ses propriétés mécaniques il se positionne comme une solution intéressante pour la fabrication de panneaux de fuselage usinés dans la masse à partir de tôles fortes (METAFOR, 2012).

L'alliage 2050 est un produit semi-fini obtenu par laminage sous forme d'une tôle de forte épaisseur (40 mm), à l'état T34 (mis en solution, trempe, écrouissage à 4% et revenu). Les essais mécaniques réalisés dans le cadre de cette étude ont été réalisés sur la base de cet état métallurgique.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Li	Ag
<0.08	<0.1	3.2-3.9	0.2-0.5	0.2-0.6	0.06-0.14	0.7-0.13	0.2-0.7

Tableau I-1 : Composition chimique de l'alliage 2050 (en %m)

I.2.1.1 Microstructure et Texture de l'alliage 2050-T34

La microstructure de l'alliage 2050-T34 est montrée en Figure I-1. Celle-ci est obtenue en observant au microscope optique trois faces d'un cube de matière (40mm³). Chaque face correspond à un plan de laminage (TC-TL, TL-L et TC-L, avec L la direction de laminage) et a été polie puis attaquée au réactif de Keller (95% H₂O, 2.5% HNO₃, 1.5% HCL et 1% HF dilué, en % volumique).

Quelle que soit la face considérée, une microstructure constituée de grains non recristallisés (couleur foncée) et de grains recristallisés (couleur claire) est mise en évidence. Celle-ci présente aussi des grains fortement déformés dans le sens du laminage (Plans TC-TL et TC-L).

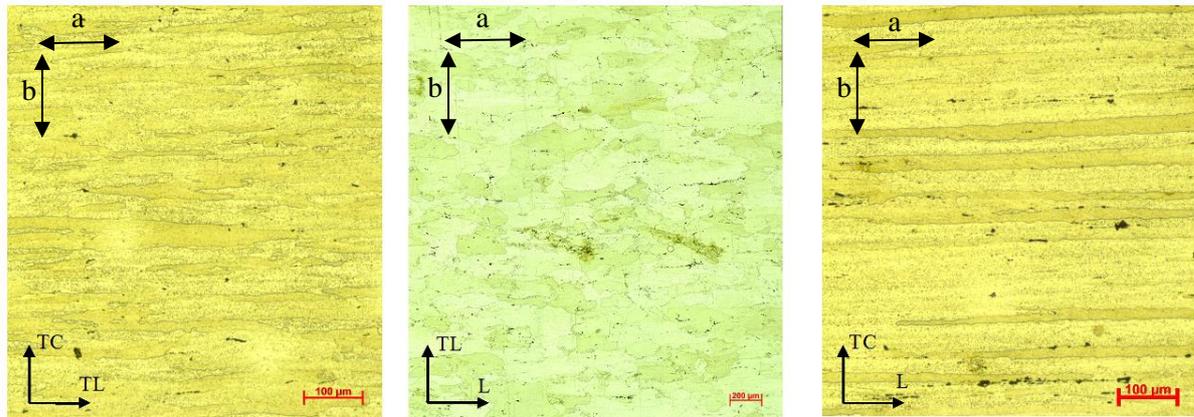
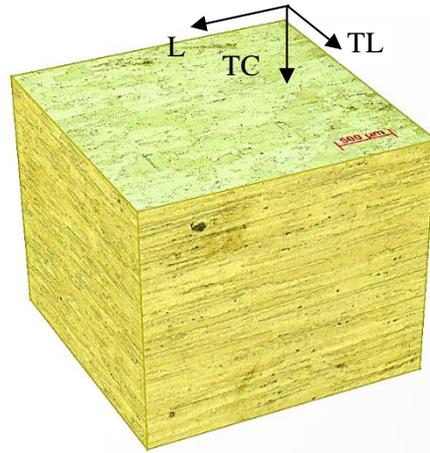


Figure I-1 : Images en microscopie optique de la microstructure de l'alliage 2050-T34

Le Tableau I-2 récapitule la longueur (direction notée (a) sur la Figure I-1) moyenne ainsi que la largeur (direction notée (b) sur la Figure I-1) moyenne des grains, déterminées en utilisant la procédure d'interception linéaire (Heyn, 1903). Un ratio (longueur/largeur) d'environ 7.6, 12.8 et 2.1 est trouvé dans le plan, respectivement, TC-TL, TC-L et TL-L.

	Plan TC-TL	Plan TL-L	Plan TC-L
Longueur moyenne (µm)	334	276	423
Largeur moyenne (µm)	44	125	33

Tableau I-2 : Taille des grains de l'alliage d'aluminium 2050-T34

L'évolution de la texture cristallographique de l'alliage suivant son épaisseur est étudiée grâce à des mesures par Diffraction des Rayons X (Bunge, 1982) afin de vérifier si le matériau présente un caractère hétérogène. Cette méthode ne fournit toutefois qu'une information superficielle sur les orientations préférentielles de la microstructure.

La détermination de la texture cristallographique par DRX¹ est une méthode qui utilise un faisceau de rayons X impactant le cristal et provoquant la dispersion du faisceau lumineux dans des directions spécifiques. Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons réfractés, il est possible d'obtenir une image tridimensionnelle de la densité électronique dans le cristal. À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du cristal peut être déterminée, ainsi que leurs liaisons chimiques, leur entropie et d'autres informations. Pour un polycristal, il est possible de mesurer, par des figures de pôles, la distribution des normales d'une famille de plans cristallographiques $\{hkl\}$. Les figures de pôles sont obtenues en plaçant un échantillon du polycristal dans un goniomètre de diffraction pour lequel le détecteur est positionné de sorte à vérifier les conditions de diffraction correspondant à une famille de plans préalablement choisie ($\{111\}$, $\{200\}$ et $\{220\}$).

¹ DRX : Diffractométrie de Rayons X

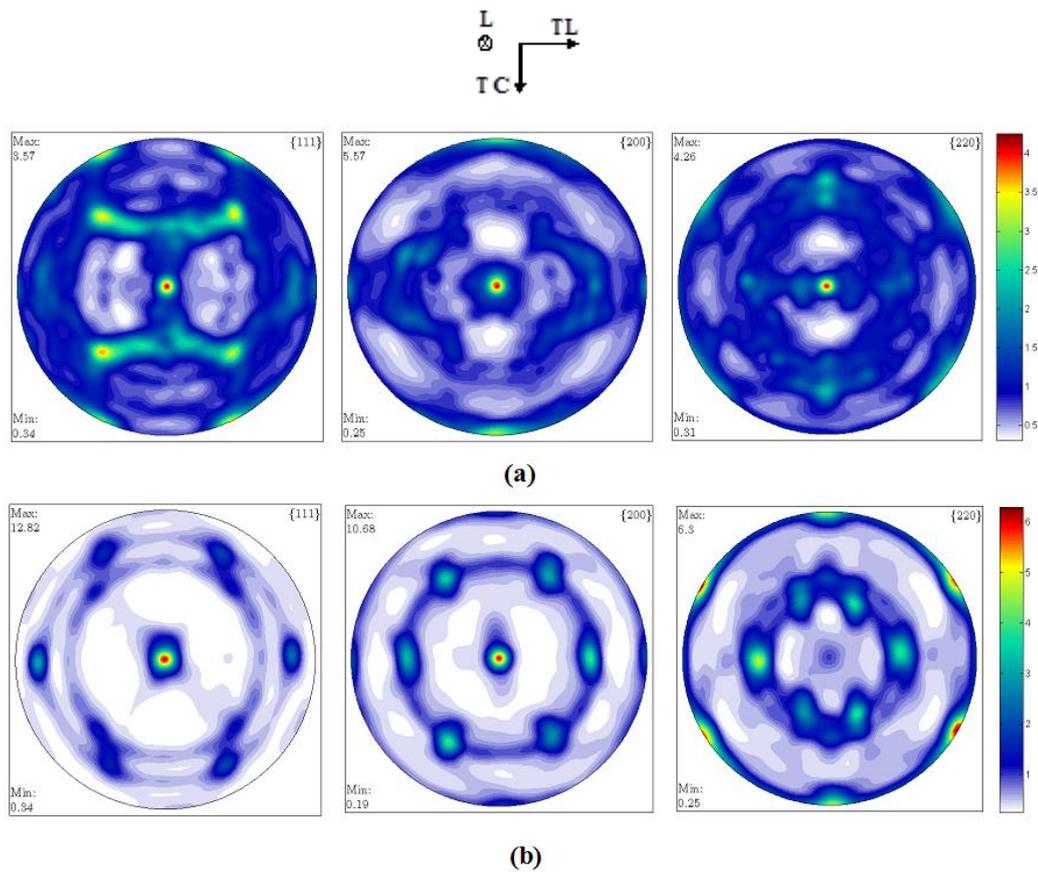


Figure I-2 : Figures de pôles obtenues pour l'alliage d'aluminium 2050-T34 : (a) $\frac{1}{4}$ de la tôle et (b) $\frac{1}{2}$ de la tôle

Dans le cas présent, trois positions selon l'épaisseur ont été analysées : $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ de la tôle. La zone analysée, représente une taille de 4 mm² et est située sur le plan défini par les directions TC et TL. Les résultats obtenus sont montrés en Figure I-2. Une texture cristallographique identique est observée au quart et aux trois quarts de l'épaisseur la tôle. Une texture différente apparait, par contre, sur la ligne médiane. Cette différence de texture devrait engendrer un comportement mécanique différent (Cho, et al., 1999) suivant la zone sollicitée dans l'épaisseur de la tôle.

1.2.1.2 Principales caractéristiques de l'alliage 2050-T34 à température ambiante

Le Tableau I-3 fournit les principales caractéristiques mécaniques normalisées de l'alliage 2050 à température ambiante. La normalisation a été réalisée en divisant chaque donnée par la valeur correspondante à un alliage type de la série 2xxx.

Il est possible de remarquer que l'ajout de lithium dans un alliage d'aluminium cuivre permet d'avoir de meilleures caractéristiques mécaniques et une densité plus faible (diminution de 3%) en les comparant avec l'alliage de référence. Une diminution de 5% de l'allongement à la rupture est aussi constatée, avec, bien évidemment, une augmentation de 11% et de 15%, respectivement, de la limite d'élasticité et de la contrainte à la rupture.

Module d'Young normalisé $E/E_{réf}$	Densité normalisée $\rho/\rho_{réf}$	Limite élastique $R_{p0.2}/R_{p0.2réf}$	Contrainte à rupture $R_m/R_{réf}$	Allongement à rupture $A/A_{réf}$
0.98	0.97	1.13	1.18	0.95

Tableau I-3 : Propriétés mécaniques normalisés de l'alliage 2050-T34 à température ambiante

Une mesure de micro-dureté Vickers (HV0.2) dans l'épaisseur de la tôle à l'état T34 a été également réalisée. La Figure I-3 illustre l'évolution de cette grandeur, normalisée par la micro-dureté moyenne, en fonction de la distance avec le bord de la tôle (0 μm). La micro-dureté évolue peu selon l'épaisseur de la tôle avec une variation de seulement 6% par rapport à la valeur moyenne.

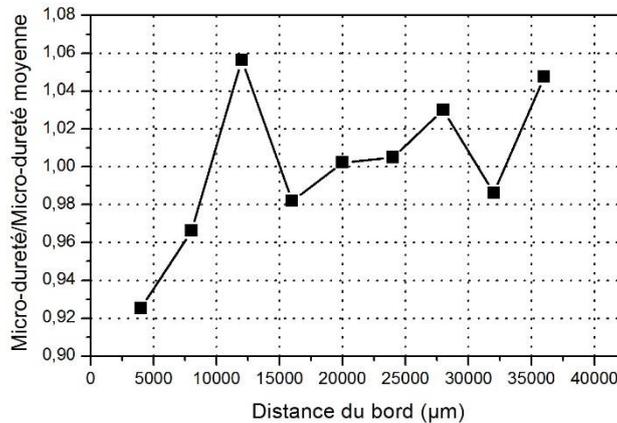


Figure I-3 : Évolution de la micro-dureté normalisée en fonction de l'épaisseur dans la tôle en 2050

I.2.1.3 Evolution du module d'Young en fonction de la température

Afin d'étudier l'influence de la température sur le module d'élasticité longitudinal du matériau, des mesures reposant sur la théorie des ondes mécaniques dans les solides ont été réalisées chez Aurock.

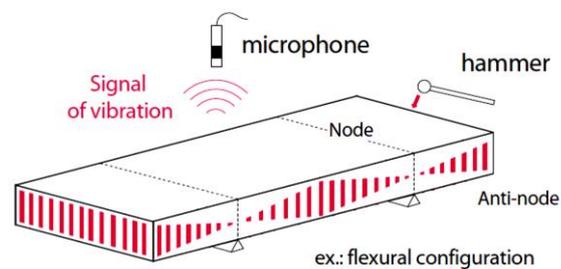


Figure I-4 : Principe de la mesure fréquentielle du module d'Young

Comme le montre la Figure I-4, une impulsion est donnée à l'échantillon à l'aide d'un marteau. L'échantillon vibre à sa fréquence de résonance. Cette fréquence sera caractéristique des points d'appui mécanique de l'éprouvette, de sa géométrie et de ses propriétés élastiques. Le module d'Young est déduit à partir de la fréquence de résonance f_f du 1^{er} mode propre à l'aide de l'équation I.1. Les mesures ont été réalisées pendant les phases de chauffage et de refroidissement de l'échantillon.

$$E = 0.9465 \left(\frac{m f_f^2}{\omega} \right) \left(\frac{L}{t} \right)^3 \left(1 + 6.858 \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right) \quad (I.1)$$

Avec m la masse de l'échantillon, f_f la fréquence de résonance en flexion, w la largeur de l'éprouvette, L sa longueur et t son épaisseur.

La Figure I-5 montre l'évolution du module d'Young normalisé en fonction de la température. La normalisation a été effectuée en divisant le module d'Young par sa valeur à température ambiante ($E_{\text{réf}}$).

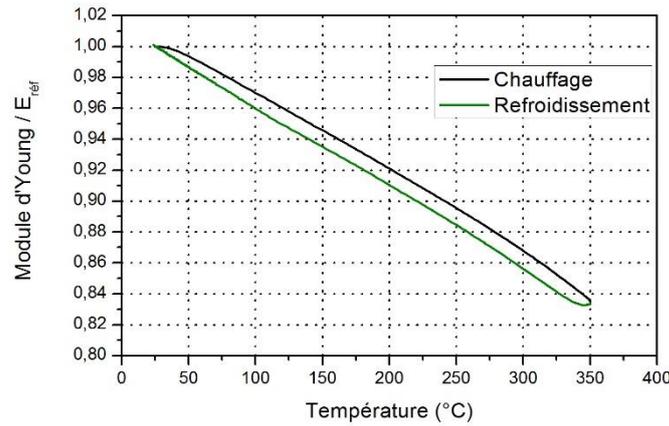


Figure I-5 : Évolution du module d'Young normalisé en fonction de la température

Une diminution de 16,5% de sa valeur a été constatée lorsque la température passe de 25 à 350°C. L'évolution du module d'Young en fonction de la température est quasiment la même dans les deux cas : chauffage et refroidissement.

1.2.1.4 Sensibilité de l'alliage 2050-T34 au durcissement structural

L'alliage 2050 est un alliage à durcissement structural par précipitation (alliage trempant). Le durcissement structural est obtenu en trois étapes (Dubost & Sainfort, 1991) : mise en solution, trempe, maturation et revenu. Des traitements thermiques de revenu ont permis de vérifier le comportement structural de cet alliage produit à l'état T34.

Des échantillons de 1cm³ ont subi ces traitements avec différents temps de maintien à la température de revenu (150°C). Une mesure de dureté Vickers (HV20) a ensuite été effectuée avec une pointe pyramidale normalisée de base carrée. Comme le montre la Figure I-6, la dureté augmente continuellement jusqu'à atteindre sa valeur maximale au bout de douze heures. Cette évolution est liée à la germination et à la croissance des précipités au sein de l'alliage.

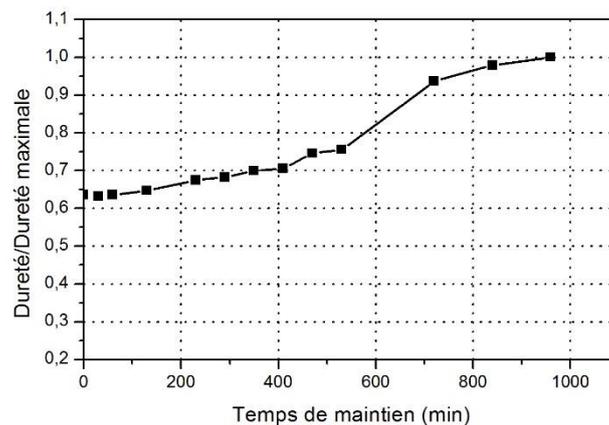


Figure I-6 : Evolution de la dureté normalisée en fonction du temps de revenu

1.2.2 L'alliage d'aluminium AW551

L'alliage AW551 est un alliage à très basse densité appartenant à la famille des Aluminium-Magnésium-Lithium. Sa composition chimique est fournie en Tableau I-4. Il est en cours de développement chez CONSTELLIUM et, à ce jour, les performances, en termes de mise en forme à haute température de cette famille d'alliages, sont assez mal connues (METAFOR, 2012).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Li	Zr
0.02-0.2	0.02-0.2	≤ 0.5	≤ 0.5	4.0-5.0	≤ 0.5	1.0-1.6	0.05-0.15

Tableau I-4 : Composition chimique de l'alliage AW551 (en %m)

L'alliage AW551 est produit sous forme d'une tôle de faible épaisseur 2 mm et d'une tôle forte d'épaisseur 40 mm, à l'état T3 (mis en solution, trempe, écrouissage et revenu). Les essais mécaniques de caractérisation ont été réalisés à cet état métallurgique sur des éprouvettes de faible épaisseur et les essais de traitements thermiques ont été effectués sur les tôles de forte épaisseur.

1.2.2.1 Microstructure de l'alliage AW551-T3

La microstructure de l'alliage AW551-T3 est montrée en Figure I-7. Celle-ci est obtenue en observant au microscope optique trois faces d'un cube de matière (40mm³). Chaque face correspond à un plan de laminage (TC-TL, TL-L et TC-L, avec L la direction de laminage) et a été polie puis attaquée. Une attaque électrochimique de Barker a été réalisée durant 60s avec une tension de 6 volts à l'aide de la machine « Polisecc c20 ».

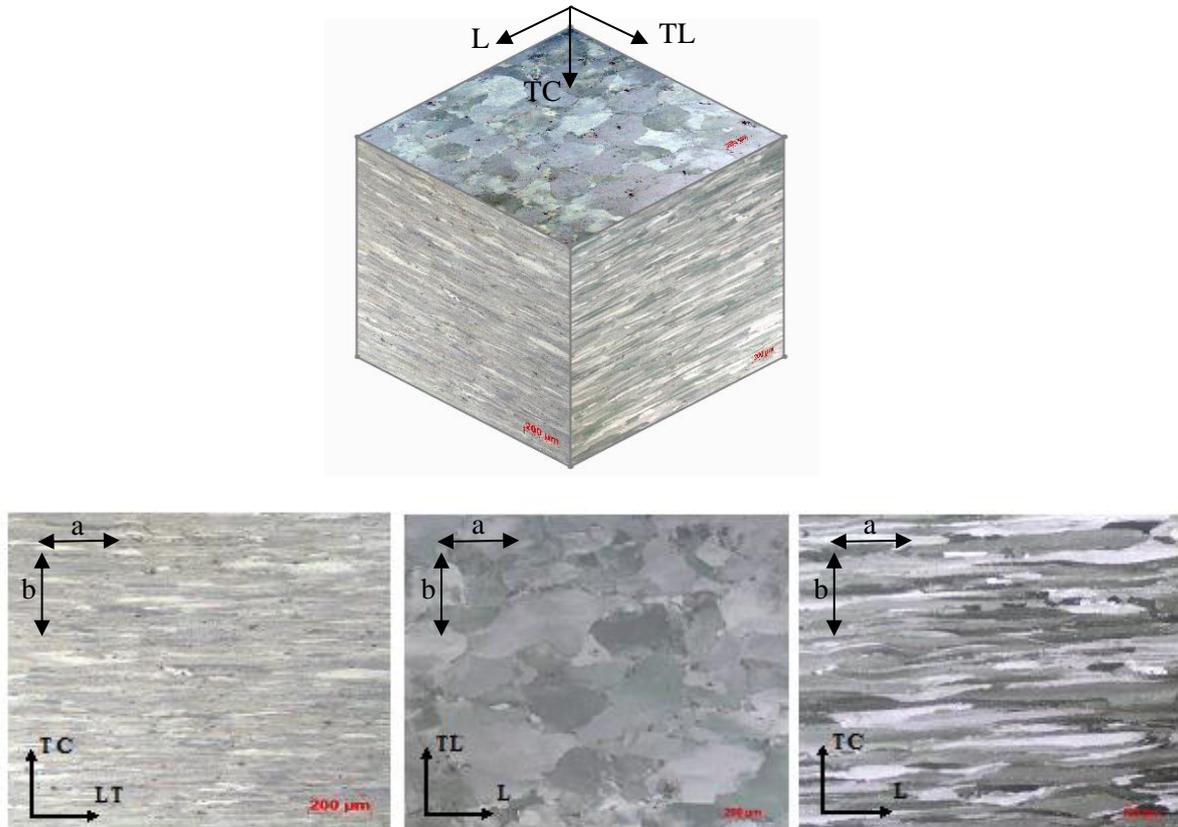


Figure I-7 : Images en microscopie optique de la microstructure de l'alliage AW551-T3

L'alliage AW551-T3 présente une microstructure similaire à celle de l'alliage 2050-T34, mais avec des grains de taille différente. La longueur (a) et la largeur (b) moyenne des grains ont été mesurées sur les trois plans de laminage (Tableau I-5) avec la procédure d'interception linéaire (Heyn, 1903). La microstructure présente des grains fortement déformés dans le sens du laminage (Plan TC-TL et TC-L) comme dans le cas de l'autre alliage. Un ratio (longueur/largeur) d'environ 9.7, 28.2 et 1.6 est trouvé dans le plan, respectivement, TC-TL, TC-L et TL-L.

	Plan TC-TL	Plan TL-L	Plan TC-L
Longueur moyenne (μm)	205	189	169
Largeur moyenne (μm)	21	113	16

Tableau I-5 : Taille des grains de l'alliage d'aluminium AW551

1.2.2.2 Principales caractéristiques de l'alliage AW551-T3 à température ambiante

Le Tableau I-6 récapitule les principales caractéristiques mécaniques normalisées de l'alliage AW551 à température ambiante. La normalisation a été réalisée en divisant chaque donnée par la valeur correspondante d'un alliage type de la série 5xxx.

Il est de nouveau possible de remarquer que l'ajout de lithium dans un alliage d'aluminium magnésium permet d'avoir de meilleures caractéristiques mécaniques (augmentation de la limite d'élasticité et de la contrainte à la rupture) et une densité plus faible (une diminution de 5%) en les comparant avec l'alliage de référence. Une diminution de 56% de l'allongement à la rupture a été constatée.

Module d'Young normalisé $E/E_{\text{réf}}$	Densité normalisée $\rho/\rho_{\text{réf}}$	Limite élastique $R_{p0.2}/R_{p0.2\text{réf}}$	Contrainte à rupture $R_m/R_{\text{réf}}$	Allongement à rupture $A/A_{\text{réf}}$
1.17	0.95	2.59	1.78	0.43

Tableau I-6 : Propriétés mécaniques normalisés de l'alliage AW551 à température ambiante

1.2.2.3 Évolution du module d'Young de l'alliage AW551-T3 avec la température

L'évolution du module d'Young avec la température est étudiée en appliquant le même principe que celui utilisé pour l'alliage d'aluminium 2050. La Figure I-8 montre l'évolution du module d'Young normalisé en fonction de la température. La normalisation a été effectuée en divisant le module d'Young par sa valeur à température ambiante ($E_{\text{réf}}$).

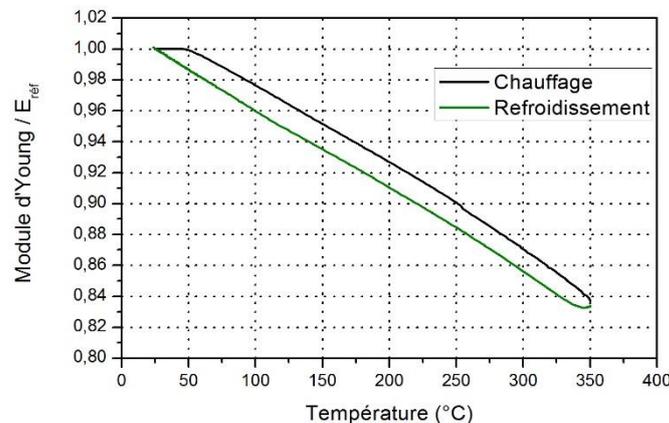


Figure I-8 : Évolution du module d'Young normalisé de l'alliage AW551 en fonction de la température

Une diminution de 17.4% de sa valeur a été constatée lorsque la température passe de 25 à 350°C. L'évolution du module d'Young en fonction de la température est quasiment identique dans les deux cas : chauffage et refroidissement.

I.2.2.4 Sensibilité de l'alliage AW551-T3 à un traitement thermique

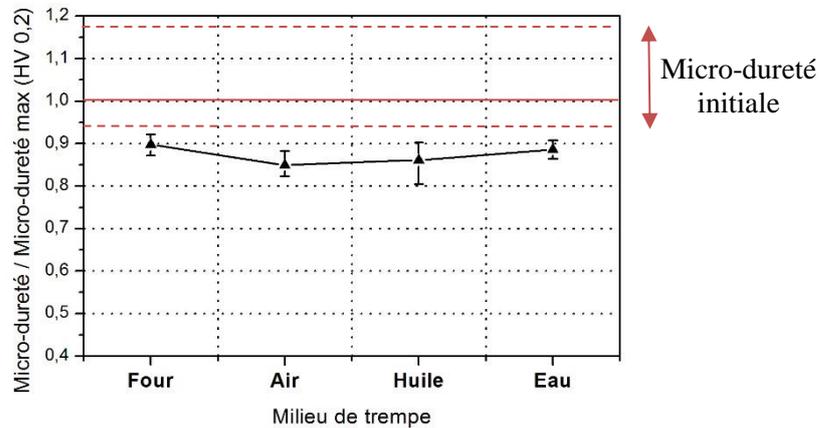


Figure I-9 : Évolution de la micro-dureté moyenne normalisée en fonction de milieux de trempe

Les alliages de la série 5xxx ne sont théoriquement pas trempants et peuvent donc être trempés à l'air après mise en forme à haute température (c.-à-d. à leur température de mise en solution). Toutefois, l'ajout de lithium peut affecter la réponse de l'alliage à la trempe.

Afin de vérifier ce point, des essais de mise en solution (350°C – 2h) puis trempe dans différents milieux ont été réalisés sur des échantillons cubiques (4 cm³). Une mesure de micro-dureté Vickers (HV0.2) a été effectuée avec une pointe pyramidale normalisée de base carrée sur les échantillons trempés. La Figure I-9 représente la valeur moyenne normalisée de la micro-dureté obtenue avec les différents milieux de trempe. Les milieux de trempe considérés sont : l'eau, l'huile, l'air et un refroidissement contrôlé dans un four. Il est possible de constater que :

- La dureté de l'alliage AW551 avant traitement thermique demeure la plus importante. En effet, avant traitement, le matériau est à l'état T3 donc écroui.
- La mise en solution de l'alliage permet d'effacer l'historique thermo-mécanique préalablement subie par l'alliage, ce qui se traduit par une dureté plus faible que l'état initial.
- Quel que soit le milieu de trempe utilisé, le niveau de dureté obtenu après trempe demeure relativement similaire.

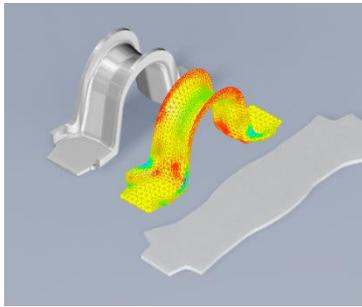
Ainsi, malgré l'ajout de lithium, l'alliage AW551 semble demeurer trempable à l'air.

I.3 Les procédés de mise en forme

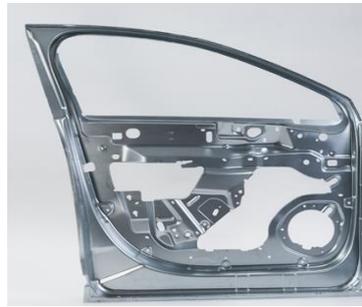
I.3.1 Mise en forme par emboutissage

L'emboutissage est un procédé de mise en forme des tôles qui permet d'obtenir des formes complexes non développables. Ce type de géométrie ne peut pas être mis à plat et comporte une courbure selon deux directions. Il permet de fabriquer, entre autres, des pièces pour l'aéronautique (comme illustré en Figure I-10a), pour l'automobile (Figure I-10b) et pour les appareils électroménagers (Figure I-10c).

Il existe trois catégories de procédés d'emboutissage : l'emboutissage à froid, à mi-chaud et à chaud (*Hot Forming*). Ils se différencient par la température à laquelle est réalisée l'opération de mise en forme, soit, pour des températures, respectivement, inférieures à $0,3T_F$, comprises entre $0,3T_F$ et $0,5T_F$ et supérieures à $0,5T_F$ (où T_F représente la température de fusion).



(a) (TopSolid, 2015)



(b) (ArcelorMittal, 2006)



(c) (ADIAMIX, 2002)

Figure I-10 : Exemples de pièces obtenues par emboutissage

1.3.1.1 Principe

Le principe est basé sur la déformation plastique du matériau avec un poinçon et une matrice. Il se pratique à l'aide de presses de forte puissance munies d'outillages spéciaux qui comportent, par principe, trois éléments :

- une matrice, en creux, qui épouse la forme extérieure de la pièce à réaliser ;
- un poinçon, en relief, qui épouse la forme intérieure de la pièce à réaliser ;
- un serre-flan autour du poinçon, qui applique une pression sur les bords de la tôle, permettant le maintien de ces-derniers en contact avec les bords de la matrice.

L'opération d'emboutissage repose sur 3 étapes principales (Figure I-11) :

- Etape 1 : Mise en position de la tôle, suivie d'un chauffage éventuel jusqu'à la température de mise en forme.
- Etape 2 : Mise en place du serre-flan et descente du poinçon à une vitesse de consigne. La descente du poinçon assure la déformation plastique de la tôle jusqu'au remplissage complet de la matrice.
- Etape 3 : Maintien éventuel du poinçon en position pour relaxer les contraintes puis remontée du poinçon et du serre-flan afin d'éjecter la pièce. Lors de la remontée du poinçon, un phénomène de retour élastique peut intervenir.

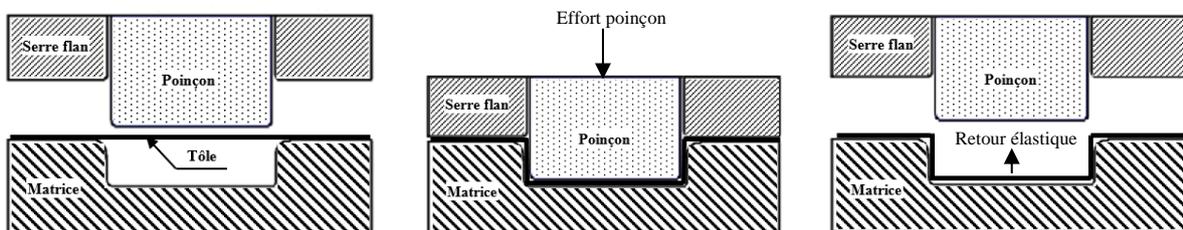


Figure I-11 : Procédé de mise en forme par emboutissage

1.3.1.2 Avantages et inconvénients du procédé d'emboutissage

Ce type de procédé de mise en forme permet d'obtenir des pièces très variées avec un bon état de surface à partir des tôles minces et épaisses. Le polissage est alors moins coûteux et le travail de finition est beaucoup moins important. Il assure aussi une cadence de production très élevées (Hami, et al., 2013).

Le problème majeur de ce procédé réside dans les contraintes résiduelles développées au sein du matériau au cours de la mise en forme. Ces contraintes provoquent un retour élastique important qui produit une différence entre la forme de la pièce voulue et celle de la pièce obtenue. Par conséquent la maîtrise des paramètres matériau/procédé permet de garantir l'intégrité des pièces fabriquées. Une des solutions consiste à réaliser une étape de relaxation après mise en forme et avant démoulage afin de diminuer le niveau des contraintes internes et contrôler le retour élastique.

1.3.2 Mise en forme par fluage

La mise en forme par fluage (*Creep Forming*) permet de combiner une opération de mise en forme avec une ou plusieurs étapes de traitement thermique. Cette option a pour avantages de simplifier la gamme de fabrication et d'augmenter la formabilité des pièces. Cette mise en forme peut être envisagée pendant le revenu (entre 150°C à 200°C) ou alors pendant la mise en solution (entre 300°C et 400°C) pour les alliages qui se trempent à l'air (ce qui correspond au cas des alliages étudiés) (METAFOR, 2012).

1.3.2.1 Principe

Ce procédé comprend généralement trois étapes principales (Figure I-12) :

- Étape 1 : Positionnement de la tôle sur la matrice ainsi que de la membrane polymère (qui assure l'étanchéité) et chauffage de l'ensemble jusqu'à une température spécifique. Cette température peut correspondre à une température de mise en solution ou à une température de revenu.
- Étape 2 : Déformation de la tôle jusqu'à ce que celle-ci épouse la forme de la matrice puis maintien pendant un temps donné en température. La déformation de la tôle peut être réalisée par trois méthodes différentes. Soit en appliquant du vide entre la tôle et la matrice, soit en exerçant une pression de gaz sur la face supérieure de la tôle ou bien en utilisant les deux méthodes simultanément. Le maintien en température après mise en forme permet de relaxer les contraintes et de générer des changements microstructuraux éventuels et propres à l'alliage utilisé (telle que la précipitation).
- Étape 3 : Refroidissement de la tôle et démoulage de la pièce. Un retour élastique peut intervenir conduisant à une forme finale entre la forme non déformée et celle déformée.

Ainsi, au cours de la mise en forme, le fluage du matériau intervient principalement lors de l'étape 2 du process. En effet, du fluage (ou relaxation) intervient lors du maintien en température. Qui plus est, si une pression constante est exercée sur la tôle lors de sa déformation, celle-ci se met en forme en fluant.

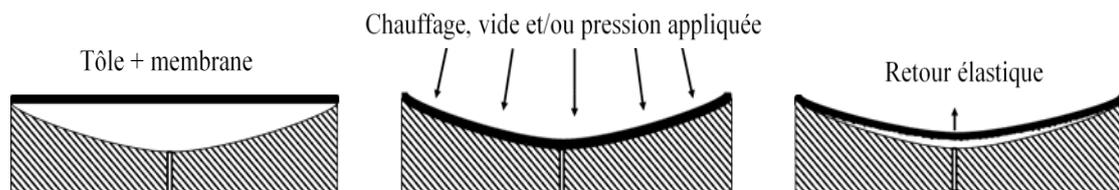


Figure I-12 : Procédé de mise en forme par fluage

1.3.2.2 Avantages et inconvénients

Ce type de procédé de mise en forme présente de nombreux avantages par rapport aux autres procédés conventionnels de mise en forme. En effet, les états de contraintes générés par la mise en forme sont inférieurs à la limite d'élasticité de l'alliage. Ils induisent donc des niveaux plus faibles de contraintes résiduelles au sein de la tôle permettant en fin de mise en forme de limiter le retour élastique.

La qualité des pièces produites est ainsi nettement améliorée. La probabilité de formation de fissures qui engendrent des instabilités plastiques ou de rupture (Holman, 1989) est diminuée. La résistance à la fatigue et la stabilité de la forme des pièces sont renforcées (Holman, 1989) et (A.W.Zhu & Jr., 2001)). Ce procédé qui combine une opération de mise en forme avec un traitement thermique induit des évolutions de la microstructure qui augmentent la résistance des alliages.

Les gammes de production des pièces sont simplifiées, permettant ainsi de réduire les coûts de fabrication (Holman, 1989) et (Zeng, et al., 2008). Mais ce type de combinaison de procédés est limité aux familles de matériaux présentant un durcissement structural comme les alliages d'aluminium de la série 2xxx, 6xxx et 7xxx (D.Bakavos, et al., 2004) et augmente considérablement le temps de fabrication d'une seule pièce.

I.4 Le cas type de pièce étudiée dans le cadre du projet METAFOR

Le projet METAFOR s'intéresse à la mise en forme à chaud de la pointe avant du fuselage des AIRBUS A320 et A350. La pièce étudiée est une partie de la casquette double courbure représentée en Figure I-13. Elle est définie par une surface gauche de 0.55 m² (550 mm x 1000 mm) présentant un ratio de 2.8 entre les deux rayons de courbure.

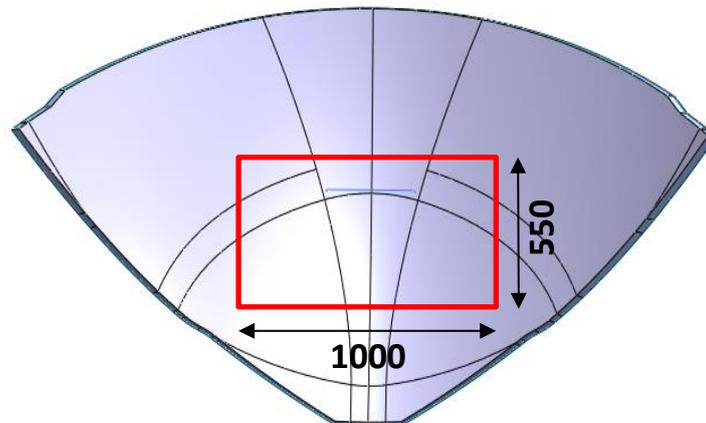


Figure I-13 : Partie de la casquette double courbure

Sur ce type de pièce, des raidisseurs sont nécessaires dans le but d'augmenter sa résistance au flambement et de retarder sa fissuration en fatigue. Deux approches sont adoptées dans ces travaux pour la fabrication de ce prototype (Figure I-14). La première consiste à mettre en forme une tôle de forte épaisseur et à usiner par la suite dans la masse les raidisseurs. Cela permet de réduire les coûts d'assemblage et l'intégration de fonctions de sous-raissage. La deuxième approche repose sur la mise en forme d'une tôle mince suivie d'une opération de soudage des raidisseurs.

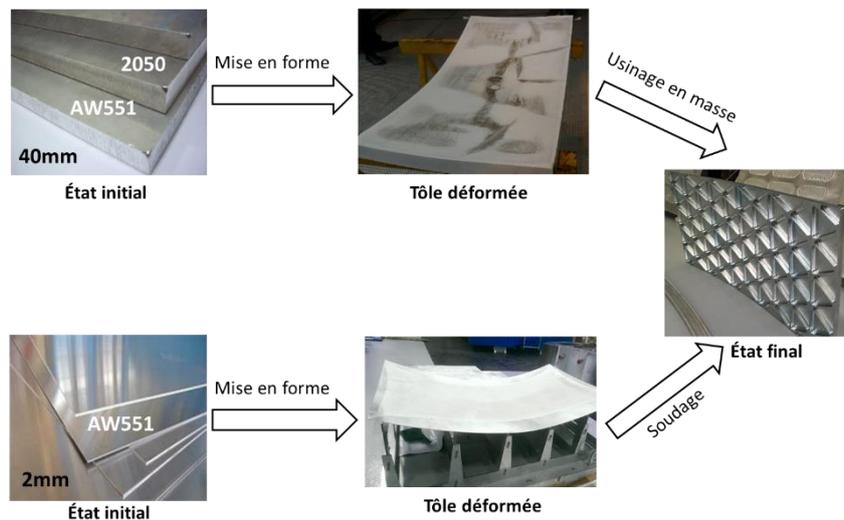


Figure I-14 : Approches adoptées pour la fabrication de la pièce prototype

Chacune des approches détaillées ci-dessus conduit à l'utilisation d'un procédé de mise en forme différent et adapté à l'épaisseur initiale de la tôle. Le procédé d'emboutissage est utilisé pour la mise en forme de tôles de forte épaisseur (40 mm) tandis que le procédé de formage au fluage est utilisé pour la mise en forme de tôles de faible épaisseur (2mm). Pour les tôles de forte épaisseur, les deux alliages (2050 et AW551) sont considérés alors que, dans le cas des tôles de faible épaisseur, seul l'alliage AW551 est considéré.

Les températures de mise en forme utilisées sont adaptées à chaque alliage. L'alliage 2050 est mis en forme à sa température de revenu (soit 150°C) afin d'assurer pendant sa mise en forme le durcissement par précipitation. Un maintien en température d'une durée suffisante est réalisé après mise en forme pour assurer le durcissement, ce qui conduit à une relaxation des contraintes et par conséquent à une diminution du retour élastique. L'alliage AW551 est mis en forme à sa température de mise en solution (soit 350°C), ce qui permet de diminuer les efforts de formage et, par conséquent, de limiter le retour élastique. L'utilisation d'une température aussi élevée pour le formage au fluage nécessite d'ailleurs l'adaptation du process classiquement utilisé (cf. chapitre 6).

Dans tous les cas, les tôles ne sont pas bridées et sont simplement posées sur la matrice à double courbure.