

DESCRIPTION**Titre : PROCEDE DE FABRICATION D'UNE PIECE EN ALLIAGE D'ALUMINIUM****Domaine technique**

Le domaine technique de l'invention est un procédé de fabrication d'une pièce en alliage
5 d'aluminium, mettant en œuvre une technique de fabrication additive.

Art antérieur

Depuis les années 80, les techniques de fabrication additive se sont développées. Elles consistent à mettre en forme une pièce par ajout de matière, ce qui est à l'opposé des techniques d'usinage, qui visent à enlever de la matière. Autrefois cantonnée au prototypage,
10 la fabrication additive est à présent opérationnelle pour fabriquer des produits industriels en série, y compris des pièces métalliques.

Le terme « fabrication additive » est défini selon la norme française XP E67-001 comme un "ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique". La norme ASTM F2792 (janvier 2012) définit
15 également la fabrication additive. Différentes modalités de fabrication additive sont aussi définies et décrites dans la norme ISO/ASTM 17296-1. Le recours à une fabrication additive pour réaliser une pièce en aluminium, avec une faible porosité, a été décrit dans le document WO2015/006447. L'application de couches successives est généralement réalisée par application d'un matériau dit d'apport, puis fusion ou frittage du matériau d'apport à l'aide d'une
20 source d'énergie de type faisceau laser, faisceau électronique, torche plasma ou arc électrique. Quelle que soit la modalité de fabrication additive appliquée, l'épaisseur de chaque couche ajoutée est de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de microns.

D'autres méthodes de fabrication additive sont utilisables. Citons par exemple, et de façon non limitative, la fusion ou le frittage d'un matériau d'apport prenant la forme d'une poudre, par
25 exemple la fusion ou le frittage laser. La demande de brevet US2017/0016096 décrit un procédé de fabrication d'une pièce par fusion localisée obtenue par l'exposition d'une poudre à un faisceau d'énergie de type faisceau d'électrons ou faisceau laser, le procédé étant également appelé fusion laser sur lit de poudre ("Laser Powder Bed Fusion"), fusion laser sélective sur lit de poudre ou fusion par faisceau d'électrons ("Electron Beam Melting").

30 La personne du métier connaît des solutions qui permettent une stabilité thermique des propriétés mécaniques, mais qui ne sont pas forcément adaptées aux hautes températures (voir

par exemple la demande de brevet WO202/070451, qui divulgue un alliage comprenant de 1 à 10 % de Fe, de 1 à 10 % de Cr et optionnellement jusqu'à 4 % de Zr, Hf, Er, Sc et/ou Ti).

Les propriétés mécaniques des pièces d'aluminium obtenues par fabrication additive dépendent de l'alliage formant le métal d'apport, et plus précisément de sa composition, ainsi que des
5 traitements thermiques appliqués suite à la mise en œuvre de la fabrication additive.

La demanderesse a déterminé une composition d'alliage qui, utilisée dans un procédé de fabrication additive, permet d'obtenir des pièces aux performances mécaniques remarquables, sans qu'il soit nécessaire de mettre en œuvre des traitements thermiques de type mise en solution et trempe.

10 Selon une variante de la présente invention, avec un choix judicieux des éléments d'addition, la demanderesse a identifié des compositions d'alliages d'aluminium destinées aux procédés de fabrication additive permettant d'obtenir à la fois, une très bonne processabilité des pièces, en particulier dans les procédés de type fusion laser sur lit de poudre, et d'excellentes performances mécaniques des pièces en service à haute température, c'est-à-dire pour des
15 températures supérieures ou égales à 200°C. Les excellentes performances mécaniques des pièces en service peuvent être obtenues en maximisant la limite élastique des pièces à 200°C ou à 250°C après un traitement thermique post-fabrication, par exemple de 1h à 400°C. A titre d'illustration, la limite élastique $R_{p0,2}$ obtenue peut être supérieure ou égale à 165 MPa à 250°C.

Les poudres d'aluminium pur peuvent être utilisées comme réducteur dans le propergol solide
20 des propulseurs aérospatiaux. Par conséquent, les poudres d'aluminium avec plus de 97 % d'aluminium sont généralement considérées dans certains pays comme des biens à double usage (BDU) nécessitant des licences d'exportation. Cette classification représente une contrainte qui peut freiner la commercialisation de certaines poudres d'aluminium comprenant plus de 97 % d'aluminium destinées aux procédés de fabrication additive, comme par exemple
25 la fusion laser sur lit de poudre. Il apparaît ainsi avantageux que la solution développée présente moins de 97 % d'aluminium, c'est-à-dire plus de 3 % d'éléments d'addition au total.

Selon une autre variante de la présente invention, avec un choix judicieux des éléments d'addition, la demanderesse a identifié des compositions d'alliages d'aluminium destinées aux procédés de fabrication additive, en particulier la fusion laser sur lit de poudre, ces compositions
30 comportant plus de 3 % d'éléments d'addition au total et permettant une bonne processabilité des pièces en procédé de fusion laser sur lit de poudre, tout en maximisant les performances mécaniques des pièces en service.

Exposé de l'invention

Un premier objet de l'invention est un procédé de fabrication d'une pièce comportant une formation de couches métalliques successives, superposées les unes aux autres, chaque couche étant formée par le dépôt d'un métal d'apport, le métal d'apport étant soumis à un apport
5 d'énergie de façon à entrer en fusion et à constituer, en se solidifiant, ladite couche, le procédé étant caractérisé en ce que le métal d'apport est un alliage d'aluminium comportant les éléments d'alliage suivant en pourcentages massiques :

- au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er, selon une fraction massique de 0,01 à 1,60 %, de préférence de 0,03 à 1,50 %, de préférence de 0,05 à 1,40 %, de préférence de
10 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,20 à 1,25 %, de préférence de 0,30 à 1,20 %, de préférence de 0,40 à 1,00 %, de préférence de 0,50 à 0,90 %, de préférence de 0,60 à 0,80 % chacun et au total ;
- Fe, selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 3,00 %, de préférence de 0,30 à 3,00 %, de préférence de 0,40 à 3,00 %, de
15 préférence de 0,50 à 2,90 %, de préférence de 0,60 à 2,80 %, de préférence de 0,70 à 2,70 %, de préférence de 0,80 à 2,70 %, de préférence de 0,90 à 2,60 %, de préférence de 0,90 à 2,50 %, de préférence de 0,90 à 2,40 %, de préférence de 0,90 à 2,30 %, de préférence de 0,90 à 2,20 % ;
- Cr, selon une fraction massique de 0,50 à 4,00 %, de préférence de 0,70 à 4,00 %, de préférence de 1,00 à 4,00 %, de préférence de 1,30 à 3,90 %, de préférence de 1,50 à 3,80 %, de
20 préférence de 1,60 à 3,70 %, de préférence de 1,70 à 3,60 %, de préférence de 1,75 à 3,50 %, de préférence de 1,75 à 3,40 %, de préférence de 1,75 à 3,30 %, de préférence de 1,75 à 3,20 %, de préférence de 1,80 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,00 %, de préférence de 1,90 à 2,50 %, de préférence de 1,90 à 2,20 % ;
- Mg, selon une fraction massique de 0,01 à 3,50 %, de préférence de 0,03 à 3,50 %, de
25 préférence de 0,05 à 3,50 %, de préférence de 0,10 à 3,40 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,50 %, de préférence de 0,50 à 1,20 % ;
- optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Mn, V et Ti selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de
30 préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 %, chacun et au total ;

- optionnellement Mo, selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 % ;
- optionnellement Si, selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,20 %, de préférence inférieure ou égale à 0,15 %, de préférence inférieure ou égale à 0,10 % ;
- optionnellement Ni, selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 % de préférence inférieure ou égale à 0,50 % ;
- optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Cu et Ag, selon une fraction massique de 0,05 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Cu ;
- selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 2,00 %, de préférence de 0,10 à 1,60 %, de préférence de 0,10 à 1,50 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Ag et au total ;
- optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zn et Li, selon une fraction massique inférieure à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 % chacun et au total ;
- optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et Sn, selon une fraction massique inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 %, encore plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,10 % chacun, et inférieure

ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,30 % au total ;

- impuretés : < 0,05 % individuellement, et de préférence < 0,15 % au total ;

reste aluminium.

5 Chaque couche peut notamment décrire un motif défini à partir d'un modèle numérique.

Selon un mode de réalisation, le métal d'apport prend la forme d'une poudre, dont l'exposition à un faisceau de lumière ou de particules chargées résulte en une fusion localisée suivie d'une solidification, de façon à former une couche solide. Selon un autre mode de réalisation, le métal d'apport est issu d'un fil d'apport, dont l'exposition à une source de chaleur, par exemple un arc
10 électrique, résulte en une fusion localisée suivie d'une solidification, de façon à former une couche solide.

Un deuxième objet de l'invention est une pièce métallique, obtenue par un procédé selon le premier objet de l'invention.

Un troisième objet de l'invention est un matériau d'apport, notamment un fil d'apport ou une
15 poudre, destiné à être utilisé en tant que matériau d'apport d'un procédé de fabrication additive, caractérisé en ce qu'il est constitué d'un alliage d'aluminium, comportant les éléments d'alliage suivants (pourcentages massiques) :

- au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er, selon une fraction massique de 0,01 à 1,60 %, de préférence de 0,03 à 1,50 %, de préférence de 0,05 à 1,40 %, de préférence de
20 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,20 à 1,25 %, de préférence de 0,30 à 1,20 %, de préférence de 0,40 à 1,00 %, de préférence de 0,50 à 0,90 %, de préférence de 0,60 à 0,80 % chacun et au total ;

- Fe, selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 3,00 %, de préférence de 0,30 à 3,00 %, de préférence de 0,40 à 3,00 %, de
25 préférence de 0,50 à 2,90 %, de préférence de 0,60 à 2,80 %, de préférence de 0,70 à 2,70 %, de préférence de 0,80 à 2,70 %, de préférence de 0,90 à 2,60 %, de préférence de 0,90 à 2,50 %, de préférence de 0,90 à 2,40 %, de préférence de 0,90 à 2,30 %, de préférence de 0,90 à 2,20 % ;

- Cr, selon une fraction massique de 0,50 à 4,00 %, de préférence de 0,70 à 4,00 %, de préférence de 1,00 à 4,00 %, de préférence de 1,30 à 3,90 %, de préférence de 1,50 à 3,80 %, de
30 préférence de 1,60 à 3,70 %, de préférence de 1,70 à 3,60 %, de préférence de 1,75 à 3,50 %, de préférence de 1,75 à 3,40 %, de préférence de 1,75 à 3,30 %, de préférence de 1,75 à 3,20 %, de préférence de 1,80 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,00 %, de préférence de 1,90 à 2,50 %, de préférence de 1,90 à 2,20 % ;

- Mg, selon une fraction massique de 0,01 à 3,50 %, de préférence de 0,03 à 3,50 %, de préférence de 0,05 à 3,50 %, de préférence de 0,10 à 3,40 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,50 %, de préférence de 0,50 à 1,20 % ;
- 5 - optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Mn, V et Ti selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 %, chacun et au total ;
- 10 - optionnellement Mo, selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 % ;
- 15 - optionnellement Si, selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,20 %, de préférence inférieure ou égale à 0,15 %, de préférence inférieure ou égale à 0,10 % ;
- 20 - optionnellement Ni, selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 % de préférence inférieure ou égale à 0,50 % ;
- 25 - optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Cu et Ag, selon une fraction massique de 0,05 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Cu ;
- 30 - selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 2,00 %, de préférence de 0,10 à 1,60 %, de préférence de 0,10 à 1,50 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de

0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Ag et au total ;

- optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zn et Li, selon une fraction massique inférieure à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 % chacun et au total;
 - optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et Sn, selon une fraction massique inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 %, encore plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,10 % chacun, et inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,30 % au total ;
 - impuretés : < 0,05 % individuellement, et au total < 0,15 % ;
- reste aluminium.

L'alliage d'aluminium formant le matériau d'apport peut présenter les caractéristiques décrites en lien avec le premier objet de l'invention.

Le matériau d'apport peut se présenter sous la forme d'une poudre. La poudre peut être telle qu'au moins 80 % des particules composant la poudre ont une taille moyenne dans la plage suivante : 5 à 200 µm, de préférence de 5 à 150 µm, de préférence de 5 à 25 µm, ou de 20 à 60 µm ou de 20 à 80 µm ou de 20 à 90 µm ou de 20 à 100 µm ou de 20 à 110 µm ou de 20 à 120 µm.

Lorsque le matériau d'apport se présente sous la forme d'un fil, le diamètre du fil peut notamment être compris de 0,5 mm à 3 mm, et de préférence compris de 0,5 mm à 2 mm, et encore de préférence compris de 1 mm à 2 mm.

Un quatrième objet de l'invention est l'utilisation d'une poudre ou d'un fil d'apport tels que décrits ci-avant et dans le reste de la description dans un procédé de fabrication additive choisi parmi : la fusion laser sur lit de poudre, la fusion par faisceau d'électrons (electron beam melting), la pulvérisation à froid, le dépôt par fusion laser, la fabrication additive par friction, le frittage par étincelle au plasma ou le soudage par friction rotative, de préférence la fusion laser sur lit de poudre.

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, et

représentés sur les figures listées ci-dessous.

Figures

La Figure 1 est un schéma illustrant un procédé de fabrication additive de type fusion laser sur lit de poudre.

- 5 La Figure 2 est un schéma illustrant un procédé de fabrication additive de type fabrication additive arc fil.

La Figure 3 est un schéma de l'éprouvette utilisée selon les exemples.

Expose de modes de réalisation particuliers

Dans la description, sauf indication contraire :

- 10 - la désignation des alliages d'aluminium est conforme à la nomenclature de The Aluminum Association ;
- les teneurs en éléments chimiques sont désignées en % et représentent des fractions massiques. La notation $x\% - y\%$ signifie supérieur ou égal à $x\%$ et inférieur ou égal à $y\%$.

Par impuretés, on entend des éléments chimiques présents dans l'alliage de façon non intentionnelle, de préférence selon une fraction massique inférieure à 0,05 %.

15

Selon la présente invention, l'expression « *au moins un élément d'alliage choisi parmi : X, Y (...) et Z* » signifie que chacun des éléments cités peut être présent, seul ou en combinaison avec n'importe lequel ou n'importe lesquels des autres éléments, selon les fractions massiques précisées. Cette expression couvre donc chacun des éléments cités et toutes leurs combinaisons possibles.

20

Selon la présente invention, les éléments optionnels sont :

- soit absents, c'est-à-dire considérés comme une impureté non-intentionnelle selon une fraction massique inférieure à 0,05 %,
- soit présents selon les fractions massiques précisées.

- 25 La Figure 1 schématise le fonctionnement d'un procédé de fabrication additive de type fusion laser sur lit de poudre (ou Laser Powder Bed Fusion). Le métal d'apport 15 se présente sous la forme d'une poudre disposée sur un support 10. Une source d'énergie, en l'occurrence une source laser 11, émet un faisceau laser 12. La source laser est couplée au matériau d'apport par un système optique 13, dont le mouvement est déterminé en fonction d'un modèle
- 30 numérique M . Le faisceau laser 12 se propage selon un axe de propagation Z, et suit un mouvement selon un plan XY, décrivant un motif dépendant du modèle numérique M . Le plan est par exemple perpendiculaire à l'axe de propagation Z. L'interaction du faisceau laser 12 avec

la poudre 15 engendre une fusion sélective de cette dernière, suivie d'une solidification, résultant en la formation d'une couche $20_1 \dots 20_n$. Lorsqu'une couche a été formée, elle est recouverte de poudre 15 du métal d'apport et une autre couche est formée, superposée à la couche préalablement réalisée. L'épaisseur d'une couche peut par exemple être comprise de 10
5 à 250 μm , par exemple 30 μm , ou 60 μm , ou 80 μm , ou 90 μm , ou 100 μm , ou 110 μm , ou 120 μm , ou 130 μm , ou 140 μm , ou 150 μm , ou 160 μm , ou 170 μm , ou 180 μm , ou 190 μm , ou 200 μm .

Une augmentation de l'épaisseur de couche peut être bénéfique pour augmenter la productivité lors de l'impression et pour limiter la sensibilité à la fissuration thermique liée aux contraintes
10 résiduelles pendant la fabrication de la pièce et/ou lors d'un traitement thermique post-fabrication, Une augmentation de l'épaisseur de couche peut être accompagnée par une adaptation de la puissance du laser et de l'écart vecteur (distance entre deux passes laser successives) et de la vitesse de balayage du laser afin d'assurer une fusion complète de chaque couche de poudre dans des conditions optimales. L'épaisseur de couche peut être par exemple
15 comprise de 60 à 250 μm , de préférence de 80 à 200 μm , de préférence de 90 à 180 μm , de préférence de 100 à 180 μm , de préférence de 110 à 170 μm , de préférence de 120 à 160 μm .

Pour les alliages d'aluminium, le support 10 ou plateau peut être chauffé à une température de préchauffage T allant jusqu'à 500°C. Les machines disponibles actuellement sur le marché offrent généralement un chauffage du plateau jusqu'à 200°C. La température de chauffage du
20 plateau (= température de préchauffage T) peut être par exemple d'environ 50°C, ou 100°C, ou 150°C, ou 200°C, ou 250°C, ou 300°C, ou 350°C, ou 400°C, ou 450°C, ou 500°C. Le chauffage du plateau permet généralement de réduire l'humidité au niveau du lit de poudre et aussi de réduire les contraintes résiduelles sur les pièces en fabrication. Le niveau d'humidité au niveau du lit de poudre semble présenter un effet direct sur la porosité de la pièce finale. En effet, il
25 semblerait que plus l'humidité de la poudre est élevée, plus la porosité de la pièce finale est élevée. Il est à noter que le chauffage du plateau est l'une des possibilités existantes pour réaliser une fabrication additive à chaud. Cependant, la présente invention ne saurait être limitée à l'utilisation de ce seul moyen de chauffage. Tous les autres moyens de chauffage, permettant de réaliser cette étape de préchauffage, peuvent être utilisés dans le cadre de la
30 présente invention pour chauffer et contrôler la température, par exemple une lampe infra-rouge. Ainsi, le procédé selon la présente invention peut être réalisé à une température de préchauffage T allant jusqu'à 500°C. Dans les paragraphes ci-avant et ci-après, la température de préchauffage T peut concerner aussi bien le plateau, que le lit de poudre ou l'enceinte de fabrication.

Pour certaines compositions, les inventeurs ont constaté que lorsque la température de préchauffage T, par exemple du lit de poudre, est inférieure ou égale à 160°C et supérieure ou égale à 25°C, les pièces présentent une meilleure résistance à la fissuration thermique liée aux contraintes résiduelles. De préférence, le préchauffage du lit de poudre peut être effectué à une

5 température de préchauffage T inférieure ou égale à 140°C, ou, mieux, inférieure ou égale à 130°C. La température de préchauffage T est supérieure à la température ambiante. Les plages préférées de température de préchauffage T du lit de poudre sont : $25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 160^{\circ}\text{C}$, de préférence $30^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$, de préférence $50^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$, de préférence $50^{\circ}\text{C} \leq T \leq 140^{\circ}\text{C}$, de préférence $60^{\circ}\text{C} \leq T \leq 140^{\circ}\text{C}$, de préférence $70^{\circ}\text{C} \leq T \leq 135^{\circ}\text{C}$, de préférence $80^{\circ}\text{C} \leq T \leq 130^{\circ}\text{C}$.

10 Selon une alternative, la température de préchauffage T correspond aux conditions dans lesquelles une détente efficace peut être obtenue. La plage de température de préchauffage T peut alors être comprise de 300°C à 500°C, de préférence de 300 à 400°C, de préférence de 300 à 350°C. Il est considéré qu'à cette plage de température de préchauffage T, les conditions de fabrication de la pièce engendrent moins de contraintes résiduelles. Selon cette alternative, un

15 traitement thermique post-fabrication de détente, tel que décrit ci-après dans la présente description, est également pertinent.

La poudre selon la présente invention peut présenter au moins l'une des caractéristiques suivantes :

- Taille moyenne de particules de 5 µm à 200 µm, de préférence de 5 à 150 µm, de préférence
- 20 de 5 à 25 µm, ou de 20 à 60 µm, ou de 20 à 80 µm, ou de 20 à 90 µm, ou de 20 à 100 µm, ou de 20 à 110 µm, ou de 20 à 120 µm, Les valeurs données signifient qu'au moins 80 % des particules ont une taille moyenne dans la gamme spécifiée.
- Forme sphérique. La sphéricité d'une poudre peut par exemple être déterminée en utilisant un morphogranulomètre.
- 25 - Bonne coulabilité. La coulabilité d'une poudre peut par exemple être déterminée selon la norme ASTM B213 ou la norme ISO 4490 :2018. Selon la norme ISO 4490 :2018, le temps d'écoulement est de préférence inférieur à 50.
- Faible porosité, de préférence de 0 à 5 %, plus préférentiellement de 0 à 2 %, encore plus préférentiellement de 0 à 1 % en volume. La porosité peut notamment être déterminée par
- 30 analyse d'images à partir de micrographies optiques ou par pycnométrie à l'hélium (voir la norme ASTM B923).
- Absence ou faible quantité (moins de 10 %, de préférence moins de 5 % en volume) de petites particules (1 à 20 % de la taille moyenne de la poudre), dites satellites, qui collent aux particules plus grosses.

La mise en œuvre d'un tel procédé permet une fabrication de pièces selon un rendement élevé, pouvant atteindre voire dépasser 200 cm³/h par laser.

Par ailleurs, la demanderesse a observé que l'application de traitements thermiques post-fabrication de type trempe pouvaient induire une distorsion de la pièce, du fait de la variation brutale de température. La distorsion de la pièce est généralement d'autant plus significative que ses dimensions sont importantes. Or, l'avantage d'un procédé de fabrication additive est précisément d'obtenir une pièce dont la forme, après fabrication, est définitive ou quasi-définitive. La survenue d'une déformation significative résultant d'un traitement thermique post-fabrication est donc à éviter. Par quasi-définitive, il est entendu qu'un usinage de finition peut être effectué sur la pièce après sa fabrication : la pièce fabriquée par fabrication additive s'étend selon sa forme définitive, à l'usinage de finition près.

Ayant constaté ce qui précède, la demanderesse a cherché une composition d'alliage, formant le matériau d'apport, permettant d'obtenir des propriétés mécaniques et de conductivité, électrique ou thermique, acceptables, sans nécessiter l'application de traitements thermiques, subséquents à la formation des couches, c'est-à-dire suite à la formation de la pièce finale, risquant d'induire une distorsion. Il s'agit notamment d'éviter les traitements thermiques impliquant une variation brutale de la température. Ainsi, l'invention permet d'obtenir, par fabrication additive, une pièce dont les propriétés mécaniques, en particulier en termes de limite élastique, et de conductivité, électrique ou thermique, sont satisfaisantes. En fonction du type de procédé de fabrication additive choisi, le matériau d'apport peut se présenter sous la forme d'un fil ou d'une poudre.

Les éléments suivants peuvent être utilisés dans l'alliage d'aluminium.

Zr, Hf, Sc et/ou Er :

Selon la présente invention, au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er est présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique de 0,01 à 1,60 %, de préférence de 0,03 à 1,50 %, de préférence de 0,05 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,20 à 1,25 %, de préférence de 0,30 à 1,20 %, de préférence de 0,40 à 1,00 %, de préférence de 0,50 à 0,90 %, de préférence de 0,60 à 0,80 % chacun et au total. Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er est supérieure ou égale à 0,01 %, ou 0,02 %, ou 0,04 %, ou 0,06 %, ou 0,08 %, ou 0,10 %, ou 0,12 %, ou 0,14 %, ou 0,16 %, ou 0,18 %, ou 0,20 %, ou 0,22 %, ou 0,24 %, ou 0,26 %, ou 0,28 %, ou 0,30 %, ou 0,32 %, ou 0,34 %, ou 0,36 %, ou 0,38 %, ou 0,40 %, ou 0,42 %, ou 0,44 %, ou 0,46 %, ou 0,48 %, ou 0,50 %, ou 0,52 %, ou 0,54 %, ou 0,56 %, ou 0,58 %, ou 0,60 % chacun et au total, Dans un

mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er est inférieure ou égale à 1,60 %, ou 1,55 %, ou 1,50 %, ou 1,45 %, ou 1,40 %, ou 1,35 %, ou 1,30 %, ou 1,25 %, ou 1,20 %, ou 1,15 %, ou 1,10 %, ou 1,05 %, ou 1,00 %, ou 0,95 %, ou 0,90 %, ou 0,85 %, ou 0,80 % chacun et au total.

- 5 Selon une variante de la présente invention, au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er est présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique inférieure ou égale à 0,65 %, de préférence de 0,01 à 0,60 %, de préférence de 0,05 à 0,50 %, de préférence de 0,10 à 0,45 %, de préférence de 0,15 à 0,40 % chacun et au total.

- 10 Selon une autre variante de la présente invention, au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er est présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique de 0,40 % à 1,60 %, de préférence de 0,50 à 1,50 %, de préférence de 0,55 à 1,40 %, de préférence de 0,60 à 1,30 %, de préférence de 0,60 à 1,25 %, de préférence de 0,60 à 1,20 %, de préférence de 0,60 à 1,00 %, de préférence de 0,60 à 0,95 %, de préférence de 0,65 à 0,90 % chacun et au total.

- 15 Ces éléments présentent une solubilité élevée à l'état brut de fabrication, Leur ajout peut ainsi abaisser significativement la conductivité à l'état brut de fabrication. Cependant, l'ajout d'un traitement thermique post-fabrication, par exemple à une température comprise de 300 à 450°C, pour des durées de 0,5 à 10 heures, peut permettre d'abaisser significativement leurs teneurs en solution solide par la formation de dispersoïdes durcissants de type Al₃X (X= Zr ou Hf ou Sc ou Er). La formation de ces dispersoïdes lors du traitement thermique peut permettre
20 d'augmenter simultanément la dureté et la conductivité électrique par rapport à l'état brut de fabrication.

Ces éléments peuvent permettre en outre de contrôler la structure granulaire lors de la fusion laser en favorisant l'apparition de grains équiaxes.

- 25 Par ailleurs, la présence d'au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er dans l'alliage peut conférer une bonne processabilité à l'alliage, le terme processabilité correspondant à la désignation anglosaxonne "processability", qualifiant l'aptitude d'un alliage à être mis en forme par un procédé de fabrication additive. Cela peut se traduire, au niveau d'une pièce fabriquée par fabrication additive, par une quasi-absence de défauts, de type fissuration de solidification, et une faible porosité.

- 30 **Fe :**

Selon la présente invention, l'élément Fe est présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 3,00 %, de préférence de 0,30 à 3,00 %, de préférence de 0,40 à 3,00 %, de préférence de 0,50

à 2,90 %, de préférence de 0,60 à 2,80 %, de préférence de 0,70 à 2,70 %, de préférence de 0,80 à 2,70 %, de préférence de 0,90 à 2,60 %, de préférence de 0,90 à 2,50 %, de préférence de 0,90 à 2,40 %, de préférence de 0,90 à 2,30 %, de préférence de 0,90 à 2,20 %. Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Fe est supérieure ou égale à 0,05 %, ou 0,10 %, ou 0,15 %, ou 0,20 %, ou 0,25 %, ou 0,30 %, ou 0,35 %, ou 0,40 %, ou 0,45 %, ou 0,50 %, ou 0,55 %, ou 0,60 %, ou 0,65 %, ou 0,70 %, ou 0,75 %, ou 0,80 %, ou 0,85 %, ou 0,90 %. Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Fe est inférieure ou égale à 3,00 %, ou 2,95 %, ou 2,90 %, ou 2,85 %, ou 2,80 %, ou 2,75 %, ou 2,70 %, ou 2,65 %, ou 2,60 %, ou 2,55 %, ou 2,50 %, ou 2,45 %, ou 2,40 %, ou 2,35 %, ou 2,30 %, ou 2,25 %, ou 2,20 %.

Cet élément peut permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution solide et/ou par des dispersoïdes qui peuvent se former lors de la fabrication de la pièce ou lors de traitements thermiques post-fabrication. Cet élément présente une solubilité faible dans l'aluminium. L'ajout de cet élément permet d'augmenter la limite d'élasticité, mais un ajout excessif de Fe c'est-à-dire à des teneurs supérieures ou égales à 3,00 % peut conduire à une augmentation de la sensibilité à la fissuration et abaisser l'allongement à la rupture.

Cr :

Selon la présente invention, l'élément Cr est présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique de 0,50 à 4,00 %, de préférence de 0,70 à 4,00 %, de préférence de 1,00 à 4,00 %, de préférence de 1,30 à 3,90 %, de préférence de 1,50 à 3,80 %, de préférence de 1,60 à 3,70 %, de préférence de 1,70 à 3,60 %, de préférence de 1,75 à 3,50 %, de préférence de 1,75 à 3,40 %, de préférence de 1,75 à 3,30 %, de préférence de 1,75 à 3,20 %, de préférence de 1,80 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,00 %, de préférence de 1,90 à 2,50 %, de préférence de 1,90 à 2,20 %. Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Cr est supérieure ou égale à 0,50 %, ou 0,55 %, ou 0,60 %, ou 0,65 %, ou 0,70 %, ou 0,75 %, ou 0,80 %, ou 0,85 %, ou 0,90 %, ou 0,95 %, ou 1,00 %, ou 1,05 %, ou 1,10 %, ou 1,15 %, ou 1,20 %, ou 1,25 %, ou 1,30 %, ou 1,35 %, ou 1,40 %, ou 1,45 %, ou 1,50 %, ou 1,55 %, ou 1,60 %, ou 1,65 %, ou 1,70 %, ou 1,75 %, ou 1,80 %, ou 1,85 %, ou 1,90 %. Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Cr est inférieure ou égale à 4,00 %, ou 3,95 %, ou 3,90 %, ou 3,85 %, ou 3,80 %, ou 3,75 %, ou 3,70 %, ou 3,65 %, ou 3,60 %, ou 3,55 %, ou 3,50 %, ou 3,45 %, ou 3,40 %, ou 3,35 %, ou 3,30 %, ou 3,25 %, ou 3,20 %, ou 3,15 %, ou 3,10 %, ou 3,05 %, ou 3,00 %, ou 2,95 %, ou 2,90 %, ou 2,85 %, ou 2,80 %, ou 2,75 %, ou 2,70 %, ou 2,65 %, ou 2,60 %, ou 2,55 %, ou 2,50 %, ou 2,45 %, ou 2,40 %, ou 2,35 %, ou 2,30 %, ou 2,25 %, ou 2,20 %.

Cet élément peut permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution solide et/ou par des dispersoïdes qui peuvent se former lors de la fabrication de la pièce ou lors de traitements thermiques post-fabrication. L'ajout de cet élément peut permettre d'augmenter la limite d'élasticité à température ambiante et à haute température, cet effet étant accentué par la présence de Fe dans l'alliage. Ainsi un ajout simultané de Cr et de Fe peut être avantageux pour augmenter la résistance mécanique à température ambiante et à haute température (température supérieure ou égale à 200°C).

Un ajout excessif de Cr, c'est-à-dire à des fractions massiques supérieures ou égales à 4,00 %, voire à 3,20 %, voire à 2,20 %, peut conduire à une augmentation de la sensibilité à la fissuration et abaisser l'allongement à la rupture.

Le Cr présente un faible coefficient de diffusion dans l'aluminium ce qui peut permettre d'offrir une haute stabilité thermique à l'alliage.

Le Cr présente une solubilité élevée dans l'aluminium et présente un impact négatif sur la conductivité. L'utilisation de cet élément est d'intérêt pour les alliages ciblant certaines applications ne nécessitant pas de performances particulières en termes de conductivité électrique ou thermique mais qui requièrent une haute résistance mécanique, comme les pièces de structures, les blocs hydrauliques, etc...

Mg :

Selon la présente invention, l'élément Mg, est présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique de 0,01 à 3,50 %, de préférence de 0,03 à 3,50 %, de préférence de 0,05 à 3,50 %, de préférence de 0,10 à 3,40 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,50 %, de préférence de 0,50 à 1,20 %. Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Mg est supérieure ou égale à 0,01 %, ou 0,02 %, ou 0,03 %, ou 0,04 %, ou 0,06 %, ou 0,08 %, ou 0,10 %, ou 0,12 %, ou 0,14 %, ou 0,16 %, ou 0,18 %, ou 0,20 %, ou 0,22 %, ou 0,24 %, ou 0,26 %, ou 0,28 %, ou 0,30 %, ou 0,32 %, ou 0,34 %, ou 0,36 %, ou 0,38 %, ou 0,40 %, ou 0,42 %, ou 0,44 %, ou 0,46 %, ou 0,48 %, ou 0,50 %. Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Mg est inférieure ou égale à 3,50 %, ou 3,45 %, ou 3,40 %, ou 3,35 %, ou 3,30 %, ou 3,25 %, ou 3,20 %, ou 3,15 %, ou 3,10 %, ou 3,05 %, ou 3,00 %, ou 2,95 %, ou 2,90 %, ou 2,85 %, ou 2,80 %, ou 2,75 %, ou 2,70 %, ou 2,65 %, ou 2,60 %, ou 2,55 %, ou 2,50 %, ou 2,45 %, ou 2,40 %, ou 2,35 %, ou 2,30 %, ou 2,25 %, ou 2,20 %, ou 2,15 %, ou 2,10 %, ou 2,05 %, ou 2,00 %, ou 1,95 %, ou 1,90 %, ou 1,85 %, ou 1,80 %, ou 1,75 %, ou 1,70 %, ou 1,65 %, ou 1,60 %, ou 1,55 %, ou 1,50 %, ou 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %.

Cet élément peut permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution solide. Il peut permettre également, d'une manière contre intuitive, d'améliorer la résistance à la fissuration. L'ajout excessif de cet élément, par exemple à des teneurs supérieures ou égales à 3,5 %, peut dégrader la tenue en corrosion intergranulaire, par la formation de la phase anodique β (Mg_5Al_8) au niveau des joints de grains. La formation de cette phase peut se faire à température ambiante et sa formation peut être accélérée pour des températures supérieures ou égale à 60°C.

Le Mg peut permettre également d'une manière contre intuitive d'augmenter les propriétés mécaniques notamment la limite élastique ($R_{p0,2}$) et la résistance à la rupture (R_m) à chaud par exemple à 200°C ou à 250°C. L'ajout de Mg à des teneurs bien contrôlées peut permettre également d'augmenter l'allongement à rupture à chaud par exemple à 200°C ou à 250°C.

Cet impact positif de l'ajout de Mg sur l'allongement à rupture semble d'autant plus marqué quand :

- Les grains équiaxes ne forment pas un réseau tridimensionnel interconnecté ;
- La fraction surfacique de grains équiaxes est inférieure à 30 %, de préférence inférieure à 20 %, de préférence inférieure à 10 %, de préférence inférieure à 5% ;
- Les grains équiaxes présentent un diamètre moyen supérieur ou égal à 0,5 μm , de préférence supérieur ou égal à 1 μm , de préférence supérieur ou égal à 2 μm , de préférence supérieur ou égal à 3 μm , de préférence supérieur ou égal à 4 μm , de préférence supérieur ou égal à 5 μm .

Cet élément est sensible à l'évaporation lors de la fusion laser ce qui peut conduire à la formation de fumées et à des instabilités des bains de fusion. Cette évaporation doit être prise en compte pour ajuster la teneur en Mg dans la poudre en fonction de la teneur en Mg visée sur pièce.

Mn, V et/ou Ti :

Selon la présente invention, au moins un élément d'alliage choisi parmi : Mn, V et Ti peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 %, chacun et au total. Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi Mn, V et Ti est supérieure ou égale à 0,03 %, ou 0,05 %, ou 0,10 %, ou 0,15 %, ou 0,20 %, ou 0,25 %, ou 0,30 %, ou 0,35 %, ou

0,40 %, chacun et au total, Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi : Mn, V et Ti est inférieure ou égale à 3,00 %, ou 2,90 %, ou 2,80 %, ou 2,70 %, ou 2,60 %, ou 2,50 %, ou 2,40 %, ou 2,30 %, ou 2,20 %, ou 2,10 %, ou 2,00 %, ou 1,90 %, ou 1,80 %, ou 1,70 %, ou 1,60 %, ou 1,50 %, ou 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %, chacun et
5 au total.

Ces éléments peuvent permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage à température ambiante et à haute température par solution solide et/ou par des dispersoïdes qui peuvent se former lors de la fabrication de la pièce ou lors de traitements thermiques post-fabrication. Ces éléments présentent un faible coefficient de diffusion dans l'aluminium ce qui
10 permet d'offrir une haute stabilité thermique à l'alliage.

Ces éléments présentent une solubilité élevée dans l'aluminium et ont un impact négatif sur la conductivité, L'ajout de ces éléments est d'intérêt pour les alliages ciblant certaines applications ne nécessitant pas de performances particulières en termes de conductivité électrique ou thermique mais qui requièrent une haute résistance mécanique, comme les pièces de
15 structures, les blocs hydrauliques, etc...

L'ajout excessif de ces éléments peut augmenter la sensibilité à la fissuration de l'alliage, ainsi selon une variante la teneur de ces éléments est maintenue inférieure à 3,00 % chacun et au total.

De préférence, l'alliage d'aluminium comprend obligatoirement au moins un élément d'alliage
20 choisi parmi : Mn, V et Ti, dans les conditions telles que définies ci-avant, et en particulier selon les fractions massiques telles que décrites ci-avant.

Selon une variante, l'alliage d'aluminium comprend, de préférence est constitué de : 0,50 à 0,90 % d'au moins un élément d'alliage choisi parmi Zr, Hf, Sc et Er, de préférence Zr, chacun et au total ; 0,90 à 2,20 % de Fe ; 0,90 à 3,20 %, de préférence 0,90 à 2,20 % de Cr ; 0,40 à
25 1,90 %, de préférence 0,40 à 1,80 %, de préférence 0,40 à 1,50 % de Mg ; 0,40 à 1,60 % d'au moins un élément d'alliage choisi parmi Mn, V et Ti, de préférence Mn et V, chacun et au total ; optionnellement jusqu'à 0,20 %, de préférence jusqu'à 0,15 %, de préférence jusqu'à 0,10% de Si ; de préférence reste aluminium et impuretés.

Selon une variante, Ti peut être absent de l'alliage d'aluminium, c'est-à-dire éventuellement
30 présent seulement à titre d'impureté, selon une fraction massique inférieure à 0,05 %, de préférence inférieure à 0,03 %.

Mo :

Selon la présente invention, l'élément Mo, peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 %.

Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Mo est supérieure ou égale à 0,03 %, ou 0,05 %, ou 0,10 %, ou 0,15 %, ou 0,20 %, ou 0,25 %, ou 0,30 %, ou 0,35 %, ou 0,40 %.

Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Mo est inférieure ou égale à 3,00 %, ou 2,90 %, ou 2,80 %, ou 2,70 %, ou 2,60 %, ou 2,50 %, ou 2,40 %, ou 2,30 %, ou 2,20 %, ou 2,10 %, ou 2,00 %, ou 1,90 %, ou 1,80 %, ou 1,70 %, ou 1,60 %, ou 1,50 %, ou 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %.

Cet élément peut permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution solide et/ou par des dispersoïdes qui peuvent se former lors de la fabrication de la pièce ou lors de traitements thermiques post-fabrication, Cet élément présente une solubilité faible dans l'aluminium, L'ajout de cet élément peut permettre d'augmenter la limite d'élasticité, mais un ajout excessif de Mo c'est-à-dire à des teneurs supérieures ou égales à 3,00 % peut conduire à une augmentation de la sensibilité à la fissuration et abaisser l'allongement à la rupture.

Si :

Selon la présente invention, l'élément Si peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 % ; dans un mode de réalisation, la teneur en Si est inférieure ou égale à 0,30 %, de préférence inférieure ou égale à 0,20 %, de préférence inférieure ou égale à 0,15 %, de préférence inférieure ou égale à 0,10 %.

Selon une variante, l'élément Si peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique supérieure ou égale à 500 ppm, ou supérieure ou égale à 0,10 %, ou supérieure ou égale à 0,15 %.

Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Si est inférieure ou égale à 3,00 %, ou 2,90 %, ou 2,80 %, ou 2,70 %, ou 2,60 %, ou 2,50 %, ou 2,40 %, ou 2,30 %, ou 2,20 %, ou 2,10 %, ou 2,00 %, ou 1,90 %, ou 1,80 %, ou 1,70 %, ou 1,60 %, ou 1,50 %, ou 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %, ou 1,10 %, ou 1,00 %, ou 0,90 %, ou 0,80 %, ou 0,70 %, ou 0,60 %, ou 0,50 %, ou 0,45 %, ou 0,40 %, ou 0,35 %, ou 0,30 %, ou 0,25 %, ou 0,20 %, ou 0,15 %, ou 0,10 %.

Cet élément peut permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution solide et/ou par des précipités ou dispersoïdes qui peuvent se former lors de la fabrication de la pièce ou lors de traitements thermiques post-fabrication. Cet élément peut avoir un effet bénéfique en abaissant la sensibilité à la fissuration.

- 5 L'ajout de Si en présence de Zr peut conduire à la formation de phases grossières AlZrSi qui limiteraient le pouvoir durcissant du Zr après traitement thermique.

Ni :

Selon la présente invention, l'élément Ni peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de
10 préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 % de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, Selon une variante, l'élément Ni peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique supérieure ou égale à 500 ppm, ou supérieure ou égale à 0,10 %, ou supérieure ou égale à 0,15 %, ou supérieure ou égale à 0,20 %, ou supérieure ou égale à 0,30 %, ou supérieure ou égale
15 à 0,40 %.

Dans un mode de réalisation, la fraction massique de Ni est inférieure ou égale à 3,00 %, ou 2,90 %, ou 2,80 %, ou 2,70 %, ou 2,60 %, ou 2,50 %, ou 2,40 %, ou 2,30 %, ou 2,20 %, ou 2,10 %, ou 2,00 %, ou 1,90 %, ou 1,80 %, ou 1,70 %, ou 1,60 %, ou 1,50 %, ou 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %, ou 1,10 %, ou 1,00 %, ou 0,90 %, ou 0,80 %, ou 0,70 %, ou 0,60 %, ou 0,50 %.

- 20 Cet élément peut permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution solide et/ou par des dispersoïdes qui peuvent se former lors de la fabrication de la pièce ou lors de traitements thermiques post-fabrication. Cet élément présente une solubilité faible dans l'aluminium. L'ajout de cet élément peut permettre de durcir l'alliage sans avoir un impact significatif sur la conductivité.

25 **Cu et/ou Ag :**

Selon la présente invention, au moins un élément d'alliage choisi parmi : Cu et Ag peut être présent dans l'alliage d'aluminium

selon une fraction massique de 0,05 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de
30 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Cu ;

selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 2,00 %, de préférence de 0,10 à 1,60 %, de préférence de 0,10 à 1,50 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de

0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Ag et au total.

Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi :
5 Cu et Ag est supérieure ou égale à 0,05 %, ou 0,06 %, ou 0,07 %, ou 0,08 %, ou 0,09 %, ou 0,10 % chacun et au total. Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi : Cu et Ag est

inférieure ou égale à 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %, ou 1,10 %, ou 1,00 %, ou 0,90 %, ou 0,80 %, ou 0,70 % pour Cu :

10 inférieure ou égale à 3,00 %, ou 2,90 %, ou 2,80 %, ou 2,70 %, ou 2,60 %, ou 2,50 %, ou 2,40 %, ou 2,30 %, ou 2,20 %, ou 2,10 %, ou 2,00 %, ou 1,90 %, ou 1,80 %, ou 1,70 %, ou 1,60 %, ou 1,50 %, ou 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %, ou 1,10 %, ou 1,00 %, ou 0,90 %, ou 0,80 %, ou 0,70 % pour Ag et au total.

Ces éléments peuvent permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution
15 solide et/ou par des précipités durcissants qui peuvent se former lors de la fabrication de la pièce ou lors de traitements thermiques post-fabrication.

Selon une variante, Cu peut être absent de l'alliage d'aluminium, c'est-à-dire éventuellement présent seulement à titre d'impureté, selon une fraction massique inférieure à 0,05 %, de préférence inférieure à 0,03 %.

20 **Zn et/ou Li :**

Selon la présente invention, au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zn et Li peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à
25 0,30 % chacun et au total, Selon une variante, au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zn et Li peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique supérieure ou égale à 500 ppm, ou supérieure ou égale à 0,10 %, ou supérieure ou égale à 0,20 % chacun et au total.

Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi :
30 Zn et Li est inférieure à 2,00 %, ou inférieure ou égale à 1,90 %, ou 1,80 %, ou 1,70 %, ou 1,60 %, ou 1,50 %, ou 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %, ou 1,10 %, ou 1,00 %, ou 0,90 %, ou 0,80 %, ou 0,70 %, ou 0,60 %, ou 0,50 %, ou 0,40 %, ou 0,30 % chacun et au total. Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zn et Li est

supérieure ou égale à 500 ppm, ou 0,06 %, ou 0,07 %, ou 0,08 %, ou 0,09 %, ou 0,10 %, ou 0,11 %, ou 0,12 %, ou 0,13 %, ou 0,14 %, ou 0,15 %, ou 0,16 %, ou 0,17 %, ou 0,18 %, ou 0,19 %, ou 0,20 % chacun et au total.

5 Ces éléments peuvent permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution solide. Cependant, ces éléments sont sensibles à l'évaporation lors de la fusion laser ce qui peut conduire à la formation de fumées et à des instabilités des bains de fusion. L'ajout excessif de ces éléments peut abaisser significativement la conductivité électrique. Ainsi, selon un mode de réalisation, l'ajout de ces éléments est de préférence à éviter.

10 Selon une variante, Zn peut être absent de l'alliage d'aluminium, c'est-à-dire éventuellement présent seulement à titre d'impureté, selon une fraction massique inférieure à 0,05 %, de préférence inférieure à 0,03 %.

Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et/ou Sn :

15 Selon la présente invention au moins un élément d'alliage choisi parmi : Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et Sn, peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 %, encore plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,10 % chacun, et inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,30 % au total. Selon une variante, au moins un élément d'alliage choisi parmi : Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et Sn peut être présent dans l'alliage d'aluminium selon une fraction massique supérieure à 100 ppm, ou supérieure à 300 ppm, ou supérieure à 500 ppm chacun et au total.

25 Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi : Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et Sn est inférieure ou égale à 2,00 %, ou 1,90 %, ou 1,80 %, ou 1,70 %, ou 1,60 %, ou 1,50 %, ou 1,40 %, ou 1,30 %, ou 1,20 %, ou 1,10 %, ou 1,00 %, ou 0,90 %, ou 0,80 %, ou 0,70 %, ou 0,60 %, ou 0,50 %, ou 0,40 %, ou 0,30 % chacun et au total, ou inférieure ou égale à 0,20 % ou 0,10 % chacun. Dans un mode de réalisation, la fraction massique d'au moins un élément d'alliage choisi parmi : Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et Sn est supérieure ou égale à 100 ppm, ou 200 ppm ou 300 ppm ou 400 ppm ou 500 ppm chacun et au total.

Ces éléments peuvent permettre d'augmenter la résistance mécanique de l'alliage par solution solide et/ou par des dispersoïdes ou précipités qui peuvent se former lors de la fabrication de la pièce ou lors de traitements thermiques post fabrication.

5 L'ajout de Ca peut être d'intérêt, particulièrement pour limiter l'évaporation du Mg et limiter son oxydation en surface du bain liquide pendant l'étape d'atomisation et pendant l'étape de fusion laser sur lit de poudre.

Selon une variante, B peut être absent de l'alliage d'aluminium, c'est-à-dire éventuellement présent seulement à titre d'impureté, selon une fraction massique inférieure à 0,05 %, de préférence inférieure à 0,03 %, de préférence inférieure à 0,01 %, de préférence inférieure à 10 0,005 %. Le procédé peut comporter, suite à la formation des couches, c'est-à-dire suite à la formation de la pièce finale, une application d'au moins un traitement thermique. Ce traitement est également appelé traitement thermique post-fabrication ou post-traitement. Le traitement thermique post-fabrication peut être ou comporter un revenu ou un recuit. Il peut également comporter une mise en solution et une trempe, même si on préfère les éviter. Il peut également 15 comporter une compression isostatique à chaud.

Selon une première variante, afin de privilégier les propriétés mécaniques, le traitement thermique post-fabrication peut être effectué :

- à une température T' supérieure à 400°C, auquel cas la durée du traitement thermique post-fabrication est comprise de 0,1 h à 50 h, de préférence de 0,1 h à 10 h ;
- 20 - ou à une température T' comprise de 300°C à 400°C, auquel cas la durée du traitement thermique post-fabrication est comprise de 0,1 h à 200 h.

Selon une deuxième variante, afin de privilégier les propriétés de conduction thermique ou électrique, le traitement thermique post-fabrication peut être effectué à une température T' supérieure ou égale à 350°C ou à 400°C pour une durée de 0,1 h à 200 h, de façon à obtenir une 25 conductivité thermique ou électrique optimale.

Selon une autre variante, des traitements thermiques post-fabrication bi-palier peuvent permettre de maximiser la conductivité électrique. Ces traitements consistent à faire d'abord un premier palier à une température $T'1$ supérieure à 450°C pour une durée de 0,1 h à 100 h, suivi d'un deuxième palier à une température $T'2$ comprise de 300°C à 450°C pour une durée de 30 0,1 h à 200 h.

Selon une autre variante, des traitements thermiques post-fabrication bi-palier peuvent permettre de maximiser la conductivité électrique et/ou la dureté. Ces traitements consistent à faire d'abord un premier palier à une température $T'1$ inférieure à 380°C pour une durée de

0,1 h à 200 h, suivi d'un deuxième palier à une température T'2 comprise de 380°C à 450°C pour une durée de 0,1 h à 200 h.

Selon une autre variante, des traitements thermiques post-fabrication tri-palier peuvent permettre de maximiser la conductivité électrique et/ou la dureté. Ces traitements consistent à
5 faire d'abord un premier palier à une température T'1 comprise de 250°C à 450°C pour une durée de 0,1 h à 200 h, suivi d'un deuxième palier à une température T'2 supérieure à 450°C pour une durée de 0,1 h à 100 h, suivi d'un troisième palier à une température T'3 comprise de 250°C à 450°C pour une durée de 0,1 h à 200 h.

Des traitements multi-palier avec un nombre de paliers supérieur à 3 peuvent aussi être
10 envisagés.

Selon un mode de réalisation, le procédé peut comporter une compression isostatique à chaud (CIC). Le traitement CIC peut notamment permettre d'améliorer les propriétés d'allongement et les propriétés en fatigue. La compression isostatique à chaud peut être réalisée avant, après ou à la place du traitement thermique post-fabrication. Avantageusement, la compression
15 isostatique à chaud est réalisée à une température de 250°C à 500°C et de préférence de 300°C à 450°C, à une pression de 500 à 3000 bars et pendant une durée de 0,5 à 100 heures.

Pour certaines compositions et pour certains types de pièces, des fissures de type délamination peuvent apparaître dans les zones de la pièce à forte concentration de contraintes lors du traitement thermique post-fabrication des pièces, quand ce dernier est effectué dans un four
20 standard. L'utilisation du traitement CIC peut permettre d'éviter l'apparition de ces fissures.

Une fois les pièces chargées dans un four CIC, l'application de la pression avant le démarrage de la chauffe du four peut être avantageuse pour éviter la fissuration de type délamination. Par exemple, la pression peut être montée à une valeur de 1500 à 3000 bars avant le démarrage de la chauffe.

Selon un mode de réalisation avantageux, le procédé ne comporte pas de trempe suite à la formation des couches, c'est-à-dire suite à la formation de la pièce finale, ou suite au traitement thermique post-fabrication. Ainsi, de préférence, le procédé ne comporte pas d'étapes de mise en solution suivie d'une trempe.

Le recours à un traitement thermique post-fabrication, la fabrication étant réalisée par un
30 procédé de fabrication additive, peut permettre de créer des conditions de détente permettant d'éliminer les contraintes résiduelles ainsi qu'une précipitation de phases durcissantes. On parle également de détente thermique. Les inventeurs ont observé qu'il était préférable que la

température de consigne T' du traitement thermique post-fabrication soit comprise de 300°C à 500°C.

L'éventuel traitement thermique et/ou la compression isostatique à chaud peut permettre en particulier d'augmenter la dureté ou la limite élastique et la conductivité électrique du produit
5 obtenu. Il est cependant à noter que, généralement, plus la température est élevée, plus on favorise la conductivité (électrique ou thermique) au détriment des résistances mécaniques.

Selon un mode de réalisation, outre la température T' du traitement thermique post-fabrication, la montée en température, initiant le traitement thermique post-fabrication, est de préférence la plus rapide possible. Par exemple, au cours de la montée en température, la vitesse de montée
10 en température $\Delta T'$ (usuellement désignée par l'homme du métier par « *heating rate* » en °C par minute ou en °C par seconde) est de préférence supérieure à 5°C par minute ou supérieure à 10°C par minute, ou encore de préférence supérieure à 20°C par minute et plus avantageusement supérieure à 40°C par minute, et plus avantageusement supérieure à 100°C par minute. Par montée en température, on entend la montée en température à laquelle la
15 pièce est soumise au cours du traitement thermique post-fabrication. Il semble optimal que la montée en température soit instantanée, c'est-à-dire que la pièce fabriquée soit soumise, dès le début du traitement thermique post-fabrication, à la température de consigne T' du traitement thermique post-fabrication. Une montée en température instantanée peut être obtenue en plaçant la pièce fabriquée dans un four chaud, déjà porté à la température de
20 consigne T' , ou par un moyen de chauffage rapide de type lit fluidisé ou bain de sel fondu. La montée en température peut également être assurée par un chauffage par induction.

Pour une même montée en température à l'extérieur de la pièce, la variation de température à l'intérieur de la pièce dépend notamment du milieu chauffant (liquide ou air ou gaz inerte) ainsi que de la forme de la pièce. En particulier, la température dans l'épaisseur ou à la surface de la
25 pièce peut être différente. C'est la raison pour laquelle la montée en température précédemment évoquée correspond à la température à l'extérieur de la pièce. La combinaison d'une température de préchauffage T , d'une température de traitement thermique post-fabrication T' et d'une vitesse de montée en température $\Delta T'$, lors de la montée en température du traitement thermique post-fabrication, dans les plages de valeurs précitées, permet
30 l'obtention de pièces présentant une bonne résistance à la fissuration thermiques.

Selon un autre mode de réalisation, adapté aux alliages à durcissement structural, on peut réaliser une mise en solution suivie d'une trempe et d'un revenu de la pièce formée et/ou une

compression isostatique à chaud. La compression isostatique à chaud peut dans ce cas avantageusement se substituer à la mise en solution.

Cependant le procédé selon l'invention est avantageux, car il ne nécessite de préférence pas de traitement de mise en solution suivi de trempe. La mise en solution peut avoir un effet néfaste sur la résistance mécanique dans certains cas en participant à un grossissement des dispersoïdes ou des phases intermétalliques fines. De préférence, le procédé selon la présente invention ne comporte pas de mise en solution et/ou trempe suite à la formation des couches, c'est-à-dire suite à la formation de la pièce finale, ou suite au traitement thermique post-fabrication.

Selon un mode de réalisation, le procédé selon la présente invention comporte en outre optionnellement un traitement d'usinage, et/ou un traitement de surface chimique, électrochimique ou mécanique, et/ou une tribofinition. Ces traitements peuvent être réalisés notamment pour réduire la rugosité et/ou améliorer la résistance à la corrosion et/ou améliorer la résistance à l'initiation de fissures en fatigue.

Optionnellement, il est possible de réaliser une déformation mécanique de la pièce, par exemple après la fabrication additive et/ou avant le traitement thermique.

Bien que décrit en lien avec une méthode de fabrication additive de type fusion laser sur lit de poudre, le procédé peut être appliqué à d'autres méthodes de fabrication additive de type fabrication additive arc-fil (Wire plus Arc Additive Manufacturing), évoqué en lien avec l'art antérieur. La Figure 2 représente une telle alternative. Une source d'énergie 31, en l'occurrence une torche, forme un arc électrique 32. Dans ce dispositif, la torche 31 est maintenue par un robot de soudage 33. La pièce 20 à fabriquer est disposée sur un support 10. Dans cet exemple, la pièce fabriquée est un mur s'étendant selon un axe transversal Z perpendiculairement à un plan XY défini par le support 10. Sous l'effet de l'arc électrique 32, un fil d'apport 35 entre en fusion pour former un cordon de soudure. Le robot de soudage est commandé par un modèle numérique *M*. Il est déplacé de façon à former différentes couches $20_1...20_n$, empilées les unes sur les autres, formant le mur 20, chaque couche correspondant à un cordon de soudure. Chaque couche $20_1...20_n$ s'étend dans le plan XY, selon un motif défini par le modèle numérique *M*.

Le diamètre du fil d'apport est de préférence inférieur à 3 mm. Il peut être compris de 0,5 mm à 3 mm et est de préférence compris de 0,5 mm à 2 mm, voire de 1 mm à 2 mm. Il est par exemple de 1,2 mm.

D'autres procédés que la fusion laser sur lit de poudre sont par ailleurs envisageables, par exemple, et de façon non limitative :

- frittage sélectif par laser (Selective Laser Sintering) ;
 - frittage direct du métal par laser (Direct Metal Laser Sintering) ;
 - frittage sélectif par chauffage (Selective Heat Sintering) ;
 - fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting) ;
 - 5 - dépôt par fusion laser (Laser Melting Deposition) ;
 - dépôt direct par apport d'énergie (Direct Energy Deposition) ;
 - dépôt direct de métal (Direct Metal Deposition) ;
 - dépôt direct par laser (Direct Laser Deposition) ;
 - technologie de dépôt par Laser (Laser Deposition Technology) ;
 - 10 - ingénierie de formes nettes par laser (Laser Engineering Net Shaping) ;
 - technologie de plaquage par laser (Laser Cladding Technology) ;
 - technologie de fabrication de formes libres par laser (Laser Freeform Manufacturing Technology) ;
 - dépôt par fusion laser (Laser Metal Deposition) ;
 - 15 - pulvérisation à froid (Cold Spray Consolidation) ;
 - fabrication additive par friction (Additive Friction Stir) ;
 - frittage par étincelle au plasma ou frittage flash (Field Assisted Sintering Technology ou spark plasma sintering) ; ou
 - soudage par friction rotative (Inertia Rotary Friction Welding).
- 20 De préférence, la pièce selon la présente invention présente une structure de grains telle que la fraction surfacique des grains colonnaires est supérieure à 60 %, de préférence supérieure à 70 %, de préférence supérieure à 80 %, de préférence supérieure à 90 % de préférence supérieure à 95 %.
- De préférence, la pièce selon la présente invention présente au moins l'une des caractéristiques
- 25 suivantes :
- Une valeur de $R_{p0,2}$ à 250°C pour une vitesse de déformation de $5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ supérieure ou égale à 165 MPa, de préférence supérieure ou égale à 170 MPa, de préférence supérieure ou égale à 175 MPa, de préférence supérieure ou égale à 180 MPa, de préférence supérieure ou égale à 185 MPa, de préférence supérieure ou égale à 190 MPa ;
 - 30 - Une valeur de $R_{p0,2}$ à 250°C pour une vitesse de déformation de 10^{-5} s^{-1} supérieure ou égale à 160 MPa, de préférence supérieure ou égale à 165 MPa, de préférence supérieure ou égale à 170 MPa, de préférence supérieure ou égale à 175 MPa, de préférence supérieure ou égale à 180 MPa.

Les solutions selon la présente invention sont particulièrement adaptées pour les applications dans les domaines électrique, électronique et des échangeurs de chaleur.

L'invention sera exposée plus en détail dans les exemples ci-après, qui sont donnés à titre illustratif et non limitatif.

5 **Exemples expérimentaux**

Exemple 1

Une étude a été menée sur six alliages (A, B, C, D, E, F), dont les compositions, déterminées par ICP (Inductively Coupled Plasma) en pourcentages massiques, sont indiquées dans le Tableau 1 ci-après. Ces six alliages ont été obtenus sous forme de poudre à l'aide d'une atomisation par
10 jet de gaz (N2). La taille des particules des différentes poudres était essentiellement de 3 µm à 120 µm, le D10 était de 26 à 33 µm, le D50 était de 47 à 58 µm et le D90 était de 81 à 93 µm.

[Tableau 1]

Alliage	%Fe	%Zr	%Cr	%Mg	%Mn
A	1,90	0,71	2,90	-	-
B	1,90	0,72	2,90	0,85	-
C	1,90	0,74	1,90	-	-
D	1,95	0,74	1,95	0,90	-
E	1,90	0,74	1,90	-	1,00
F	1,95	0,74	1,95	0,90	1,00

A l'aide d'une machine de fusion laser sur lit de poudre de type EOSM290 (fournisseur EOS), des
15 échantillons cylindriques verticaux par rapport à la direction de construction (direction Z) ont été réalisés dans le but de déterminer les caractéristiques mécaniques des alliages. Ces échantillons avaient un diamètre de 11 mm et une hauteur de 46 mm. Lors de l'impression de ces échantillons, les principaux paramètres laser utilisés étaient les suivants : puissance laser de 370 W ; vitesse de balayage de 1300 mm/s ; écart-vecteur de 0,14 mm ; épaisseur de couche de
20 60 µm. La température de chauffage du plateau de fabrication était de 100°C. L'ensemble des échantillons a subi un traitement thermique post-fabrication de 1 heure à 400°C avec enfournement direct à 400°C.

Les échantillons cylindriques ont été usinés pour obtenir des éprouvettes de traction avec les caractéristiques suivantes, telles que décrites dans le Tableau 2 ci-après et la Figure 3.

25 **[Tableau 2]**

Type éprouvette	Ø (mm)	M (mm)	LT (mm)	R (mm)	Lc (mm)	F (mm)
TOR 4	4	8	45	3	22	8,7

Dans le Tableau 2 ci-avant et la Figure 3, Ø représente le diamètre de la partie centrale de l'éprouvette ; M la largeur des deux extrémités de l'éprouvette ; LT la longueur totale de l'éprouvette ; R le rayon de courbure entre la partie centrale et les extrémités de l'éprouvette ; Lc la longueur de la partie centrale de l'éprouvette et F la longueur des deux extrémités de l'éprouvette.

L'ensemble des éprouvettes a été testé en traction à chaud à 250°C. Une partie des éprouvettes a été testée selon la norme NF EN ISO 6892-2 (2018), avec une vitesse de déformation de $5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ jusqu'à 1% de déformation plastique, puis de $5 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ jusqu'à la rupture de l'éprouvette (cette condition d'essai est appelée « vitesse rapide » dans la suite de la description). L'autre partie des éprouvettes a été testée avec une vitesse de déformation constante de 10^{-5} s^{-1} jusqu'à la rupture de l'éprouvette (cette condition d'essai est appelée « vitesse lente » dans la suite de la description). Les principaux résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3 ci-après.

[Tableau 3]

Alliage	Vitesse de déformation	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Allongement à rupture (%)
A	Vitesse rapide	185,52	212,72	5,23
B		210,47	235,62	7,91
C		169,79	196,35	9,13
D		193,57	214,20	11,50
E		189,61	224,38	7,52
F		205,07	236,85	11,79
A	Vitesse lente	179,65	194,00	2,78
B		197,46	206,68	4,90
C		164,80	180,82	4,37
D		181,65	190,05	6,03
E		181,20	201,20	3,06
F		189,04	199,44	6,13

Le Tableau 4 ci-après permet de mettre en évidence l'effet positif de l'ajout de Mg sur les performances en traction à 250°C. Chaque alliage de la première colonne du tableau 4 est comparé dans la deuxième colonne à une référence de même composition mais qui ne contient pas de Mg. Les résultats du Tableau 4 montrent que pour l'ensemble des compositions testées et quelle que soit la vitesse de déformation choisie (vitesse rapide ou vitesse lente), l'ajout d'une teneur en Mg entre 0,80 et 1,00% a permis d'augmenter simultanément les valeurs du Rp0,2 (limite élastique), du Rm (résistance à la rupture) et du A% (allongement à la rupture). Ce résultat

est contre intuitif car une augmentation de la limite élastique ou de la résistance à la rupture d'un matériau s'accompagne généralement, d'après les connaissances de la personne du métier, d'une baisse de l'allongement à la rupture. L'augmentation simultanée de la limite élastique, de la résistance à la rupture et de l'allongement à la rupture à 250°C obtenue par l'ajout d'une teneur en Mg entre 0,80 et 1,00 % apparaît ainsi très avantageuse et surprenante. De plus, l'effet positif de l'ajout de Mg aux alliages d'aluminium sur les performances mécaniques à des températures supérieures ou égales à 200°C, comme c'est le cas dans la présente invention, n'est pas connu.

[Tableau 4]

Alliage	Référence de comparaison	Ajout de Mg (%)	Vitesse de déformation	Augmentation		
				Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Allongement à rupture (%)
B	A	+0,85	Vitesse rapide	25	22,9	2,7
D	C	+0,90		21,7	17,6	2,1
F	E	+0,90		16,6	11,3	3,6
B	A	+0,85	Vitesse lente	17,8	12,7	2,1
D	C	+0,90		16,9	9,2	1,6
F	E	+0,90		7,8	1,8	3,0

Exemple 2

Une étude similaire à celle de l'exemple 1 a été menée sur deux alliages (G et H). Les compositions, déterminées par ICP (Inductively Coupled Plasma) en pourcentages massiques, sont indiquées dans le Tableau 5 ci-après. Ces deux alliages ont été obtenus sous forme de poudre à l'aide d'une atomisation par jet de gaz (N2). La taille des particules des différentes poudres était essentiellement de 3 µm à 120 µm, le D10 était de 26 à 33 µm, le D50 était de 47 à 58 µm et le D90 était de 81 à 93 µm.

[Tableau 5]

Alliage	%Fe	%Zr	%Cr	%Mg
G	1,90	0,72	2,90	1,70
H	2,00	0,74	2,00	1,80

A partir des alliages G et H, des éprouvettes ont été fabriquées et testées en traction à 250°C dans les mêmes conditions que celles décrites dans l'exemple 1.

Les principaux résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 6 ci-après.

[Tableau 6]

Alliage	Vitesse de déformation	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Allongement à rupture (%)
G	Vitesse rapide	199,78	218,72	8,57
H		206,79	227,34	10,34
G	Vitesse lente	183,39	190,33	4,62
H		184,91	188,03	4,87

Le Tableau 7 ci-après permet de mettre en évidence l’effet sur les performances en traction à 250°C de l’ajout supplémentaire d’une teneur en Mg de 0,80 à 1,00 % par rapport à une
5 référence qui contient déjà entre 0,80 et 1,00 % de Mg.

La comparaison de l’alliage H avec l’alliage D montre que pour un essai de traction à 250°C :

- À vitesse rapide, l’ajout de 0,90 % de Mg à un alliage contenant déjà 0,90 % de Mg a présenté un impact positif sur le Rp0,2 et le Rm, mais a dégradé légèrement l’allongement à rupture.
- À vitesse lente, l’ajout de 0,90 %Mg à un alliage contenant déjà 0,90 % de Mg a présenté
10 très faible impact sur le Rp0,2 (+3,2 MPa) et sur le Rm (-2 MPa) et a abaissé l’allongement à rupture (-1,1 %).

La comparaison de l’alliage G avec l’alliage B montre que pour un essai de traction à 250°C :

- À vitesse rapide, l’ajout de 0,85 % de Mg à un alliage contenant déjà 0,85 % de Mg a présenté un impact négatif sur le Rp0,2 et le Rm, mais a amélioré l’allongement à rupture.
- À vitesse lente, l’ajout de 0,85 % de Mg à un alliage contenant déjà 0,85 % de Mg a présenté
15 un impact négatif sur le Rp0,2 et sur le Rm et a présenté un faible impact sur l’allongement à rupture (-0,3%).

Ces résultats ont montré qu’une augmentation excessive de la teneur en Mg à des teneurs supérieures ou égales à 2,50 %, et de préférence supérieures ou égales à 2,00 %, ne semble pas
20 bénéfique sur le compromis limite élastique (Rp0,2)/allongement à rupture (A%) à 250°C. L’impact négatif était plus marqué quand la teneur en Cr de l’alliage était de 2,90 % (comparaison entre les alliages G et B), que quand la teneur en Cr de l’alliage était de 2,00 % (comparaison entre les alliages H et D).

[Tableau 7]

Alliage	Référence de comparaison	Ajout de Mg (%)	Vitesse de déformation	Augmentation		
				Rp0,2 (Mpa)	Rm (Mpa)	Allongement à rupture (%)
G	B	+0,85	Vitesse rapide	-10,3	-19,8	+2,9
H	D	+0,90		15,6	11,5	-1,5
G	B	+0,85	Vitesse lente	-14,1	-16,4	-0,3
H	D	+0,90		3,2	-2	-1,1

Exemple 3

Des éprouvettes similaires à celles décrites dans les exemples 1 et 2 ont été fabriquées à partir des alliages D, E, F et H.

Ces éprouvettes ont été testées en traction à chaud à 200°C selon la norme NF EN ISO 6892-2 (2018), avec une vitesse de déformation de 5x10⁻³min⁻¹ jusqu’à 1 % de déformation plastique, puis de 5x10⁻²min⁻¹ jusqu’à la rupture de l’éprouvette (appelée « vitesse rapide » dans la suite de l’exposé). Les principaux résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 8 ci-après.

[Tableau 8]

Alliage	Vitesse de déformation	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Allongement à rupture (%)
D	Vitesse rapide	221,09	252,43	11,78
E		205,28	257,11	11,44
F		238,59	282,92	14,18
H		246,82	277,7	13,23

Le Tableau 9 ci-après permet de mettre en évidence l’effet positif de l’ajout de Mg sur les performances en traction à 200°C.

La comparaison de l’alliage F avec l’alliage E a montré que, à vitesse rapide, l’ajout d’une teneur en Mg de 0,90 % a permis d’augmenter simultanément les valeurs du Rp0,2 (limite élastique), du Rm (résistance à la rupture) et du A% (allongement à la rupture). Ce résultat est contre intuitif et confirme le résultat observé précédemment pour une température de traction de 250°C. Il est à noter que, à 200°C, l’ajout de 0,90 % de Mg a conduit à une augmentation du Rp0,2 (limite élastique) et du Rm (résistance à la rupture) plus importante que ce qui a été observé dans l’exemple 1, en comparant les performances en traction des deux mêmes alliages à 250°C.

La comparaison entre les alliages H et D a montré que l’ajout supplémentaire de 0,90 % de Mg à une référence contenant déjà 0,90 % de Mg a permis d’augmenter simultanément les valeurs du Rp0,2 (limite élastique), du Rm (résistance à la rupture) et du A% (allongement à rupture) à

250°C. Il est à noter que à 200°C, l'ajout de 0,90 % de Mg a conduit à une augmentation du Rp0,2 (limite élastique) et du Rm (résistance à la rupture) plus importante que ce qui a été observé à 250°C dans l'exemple 2, en comparant les performances en traction des deux mêmes alliages.

[Tableau 9]

Alliage	Référence de comparaison	Ajout de Mg (%)	Vitesse de déformation	Augmentation		
				Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Allongement à rupture (%)
F	E	+0,90	Vitesse rapide	33,3	25,8	2,8
H	D	+0,90		25,3	20,2	1,4

5

Exemple 4

Des éprouvettes similaires à celles de l'exemple 1 ont été fabriquées à partir des 5 alliages (F, H, I, J et K). Les compositions, déterminées par ICP (Inductively Coupled Plasma) en pourcentages massiques, sont indiquées dans le Tableau 10 ci-après. Ces cinq alliages ont été obtenus sous forme de poudre à l'aide d'une atomisation par jet de gaz (N2). La taille des particules était essentiellement de 3 µm à 120 µm, le D10 était de 26 à 33 µm, le D50 était de 47 à 58 µm et le D90 était de 81 à 93 µm.

10

[Tableau 10]

Alliage	%Fe	%Zr	%Cr	%Mg	%Mn	%V
F	1,95	0,74	1,95	0,90	1,00	
H	2,00	0,74	2,00	1,80		
I	2,00	0,76	2,00	0,90		1,00
J	2,00	0,78	2,00			2,00
K	1,90	0,73	1,90		2,00	

Des caractérisations de la structure granulaire ont été réalisées sur un échantillon par alliage en EBSD (« *Electron Back Scattered Diffraction* » ou Diffraction d'électrons rétrodiffusés) en utilisant une caméra EDAX et le logiciel OIM (« *Orientation Imaging Microscopy* » en anglais). Ces caractérisations ont été réalisées à l'aide d'un MEB-FEG de Type ZEISS Ultra 55 avec une énergie de 15keV, une distance de travail de 14 mm et un grandissement (x175), avec un pas de 0,5 µm et une surface d'analyse de 0,293 mm² (0,6125 mm x 0,4785 mm) parallèle à la direction de fabrication Z de l'échantillon. Les joints de grains ont été définis avec un angle de désorientation supérieur ou égal à 15°.

15

20

Avant la caractérisation en EBSD, tous les échantillons ont subi un polissage mécanique classique (papier abrasif avec lubrification à l'eau puis draps de polissage avec suspension diamantée)

jusqu'à 1 µm, suivi par un polissage par vibration avec une amplitude de 30 % pendant 6 heures, en utilisant comme lubrifiant une dilution de 50 % de SPM (gel de silice colloïdale) dans l'eau.

Les alliages K et J ont présenté une structure complètement colonnaire. Les alliages F et H ont présenté une structure granulaire bimodale avec présence de grains équiaxes en bas des bains de fusion et une structure colonnaire dans le centre des bains de fusion. Ce résultat a montré, d'une manière contre intuitive, que le remplacement partiel de 1 % de Mn par 1 % de Mg (comparaison entre les alliages K et F) ou le remplacement complet de 2 % de Mn par 1,8 % de Mg (comparaison entre les alliages K et H), a conduit à un changement significatif de la structure granulaire.

L'alliage I a présenté une structure complètement colonnaire. Ce résultat a montré que le remplacement de 1 % de Mn par 1 % de V (comparaison entre les alliages I et F), a permis, malgré la présence de 0,9 % de Mg dans l'alliage, de maintenir une structure granulaire complètement colonnaire. Ce résultat contre intuitif a montré qu'en présence de 0,9 % de Mg dans l'alliage, l'ajout de 1 % de V a permis d'annihiler l'effet affinant du Mg.

Sur l'ensemble des 5 alliages (F, H, I, J et K), le nombre de grains par mm² a été calculé.

La même surface d'analyse que celle décrite ci-dessus a été utilisée. Les grains qui touchent la bordure de la surface d'analyse ont été comptabilisés. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 11 ci-après.

La comparaison entre les alliages F et I a montré qu'en présence d'une teneur en Mg de 0,9 % dans l'alliage, le remplacement de 1 % de Mn par 1 % de V a permis de réduire significativement le nombre de grains par mm², qui est passé respectivement de 30881 à 3271.

La comparaison entre les alliages F et H a montré que le remplacement de 1 % de Mn par 0,9 % de Mg a permis d'augmenter le nombre de grains par mm², qui est passé respectivement de 30881 à 36693.

Les alliages I, J et K ont présenté un faible nombre de grains par mm² (entre 3000 et 4500). Parmi ces alliages, il y avait les alliages ne contenant pas de Mg (J et K) et l'alliage I qui contenait une combinaison d'ajout de 0,9 % de Mg et de 1 % de V.

Les alliages F et H ont présenté un grand nombre de grains par mm² (entre 30000 et 37000). Ces deux alliages présentaient un ajout de Mg non combiné à un ajout de V.

[Tableau 11]

Alliage	I	J	K	F	H
Nombre de grains par mm ²	3257	3758	4304	30881	36963

Les résultats décrits ci-dessus ont montré que la maîtrise des teneurs en Mg et en V de l'alliage ont permis, pour une teneur en Zr donnée de l'alliage, de contrôler la structure granulaire et ainsi permettre d'optimiser la structure granulaire en fonction de l'application finale visée. Pour une application nécessitant une tenue accrue en fluage, des structures complètement
5 colonnaires seraient à privilégier. Cependant, pour d'autres applications, par exemple les applications nécessitant un bon compromis entre les propriétés mécaniques à température ambiante et à haute température, une structure bimodale pourrait être recherchée.

Pour une paramétrie de fabrication et une température de plateau données, el choix judicieux des teneurs en Zr, Mg et V de l'alliage, a permis de contrôler la structure granulaire de pièces
10 imprimées par fabrication additive.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de fabrication d'une pièce (20) comportant une formation de couches métalliques successives ($20_1 \dots 20_n$), superposées les unes aux autres, chaque couche étant formée par le dépôt d'un métal d'apport (15, 35), le métal d'apport étant soumis à un apport d'énergie de façon à entrer en fusion et à constituer, en se solidifiant, ladite couche, le procédé étant caractérisé en ce que le métal d'apport (15, 35) est un alliage d'aluminium comportant les éléments d'alliage suivant (pourcentages massiques) :
- au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er, selon une fraction massique de 0,01 à 1,60 %, de préférence de 0,03 à 1,50 %, de préférence de 0,05 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,20 à 1,25 %, de préférence de 0,30 à 1,20 %, de préférence de 0,40 à 1,00 %, de préférence de 0,50 à 0,90 %, de préférence de 0,60 à 0,80 % chacun et au total ;
 - Fe, selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 3,00 %, de préférence de 0,30 à 3,00 %, de préférence de 0,40 à 3,00 %, de préférence de 0,50 à 2,90 %, de préférence de 0,60 à 2,80 %, de préférence de 0,70 à 2,70 %, de préférence de 0,80 à 2,70 %, de préférence de 0,90 à 2,60 %, de préférence de 0,90 à 2,50 %, de préférence de 0,90 à 2,40 %, de préférence de 0,90 à 2,30 %, de préférence de 0,90 à 2,20 % ;
 - Cr, selon une fraction massique de 0,50 à 4,00 %, de préférence de 0,70 à 4,00 %, de préférence de 1,00 à 4,00 %, de préférence de 1,30 à 3,90 %, de préférence de 1,50 à 3,80 %, de préférence de 1,60 à 3,70 %, de préférence de 1,70 à 3,60 %, de préférence de 1,75 à 3,50 %, de préférence de 1,75 à 3,40 %, de préférence de 1,75 à 3,30 %, de préférence de 1,75 à 3,20 %, de préférence de 1,80 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,00 %, de préférence de 1,90 à 2,50 %, de préférence de 1,90 à 2,20 % ;
 - Mg, selon une fraction massique de 0,01 à 3,50 %, de préférence de 0,03 à 3,50 %, de préférence de 0,05 à 3,50 %, de préférence de 0,10 à 3,40 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,50 %, de préférence de 0,50 à 1,20 % ;
 - optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Mn, V et Ti selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de

préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 %, chacun et au total ;

- 5 - optionnellement Mo, selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 % ;
- 10 - optionnellement Si, selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,20 %, de préférence inférieure ou égale à 0,15 %, de préférence inférieure ou égale à 0,10 % ;
- 15 - optionnellement Ni, selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 % de préférence inférieure ou égale à 0,50 % ;
 - optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Cu et Ag,
- 20 selon une fraction massique de 0,05 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Cu ;
selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 2,00 %, de préférence
- 25 de 0,10 à 1,60 %, de préférence de 0,10 à 1,50 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Ag et au total ;
 - optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zn et Li, selon une fraction
- 30 massique inférieure à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 % chacun et au total ;
 - optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et Sn, selon une fraction massique
- 35 inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence

- inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 %, encore plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,10 % chacun, et inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,30 % au total ;
- 5 - impuretés : < 0,05 % individuellement, et de préférence < 0,15 % au total ;
reste aluminium.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'alliage d'aluminium comprend obligatoirement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Mn, V et Ti selon les fractions
- 10 massiques décrites.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel l'alliage d'aluminium comprend, de préférence est constitué de : 0,50 à 0,90 % d'au moins un élément d'alliage choisi parmi Zr, Hf, Sc et Er, de préférence Zr, chacun et au total ; 0,90 à 2,20 % de Fe ; 0,90 à 3,20 %, de préférence 0,90 à 2,20 % de Cr ; 0,40 à 1,90 %, de préférence 0,40 à 1,80 %, de préférence
- 15 0,40 à 1,50 % de Mg ; 0,40 à 1,60 % d'au moins un élément d'alliage choisi parmi Mn, V et Ti, de préférence Mn et V, chacun et au total ; optionnellement jusqu'à 0,20 %, de préférence jusqu'à 0,15%, de préférence jusqu'à 0,10% de Si ; de préférence reste aluminium et impuretés.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la pièce
- 20 présente au moins l'une des caractéristiques suivantes :
- Une valeur de $R_{p0,2}$ à 250°C pour une vitesse de déformation de $5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ supérieure ou égale à 165 MPa, de préférence supérieure ou égale à 170 MPa, de préférence supérieure ou égale à 175 MPa, de préférence supérieure ou égale à 180 MPa, de préférence supérieure ou égale à 185 MPa, de préférence supérieure ou égale à 190 MPa ;
- 25 - Une valeur de $R_{p0,2}$ à 250°C pour une vitesse de déformation de 10^{-5} s^{-1} supérieure ou égale à 160 MPa, de préférence supérieure ou égale à 165 MPa, de préférence supérieure ou égale à 170 MPa, de préférence supérieure ou égale à 175 MPa, de préférence supérieure ou égale à 180 MPa.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la fraction
- 30 massique d'aluminium est inférieure à 97 %.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant, suite à la formation des couches (20₁...20_n), c'est-à-dire suite à la formation de la pièce finale, une

application d'un traitement thermique post-fabrication, de préférence un revenu ou un recuit.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, ne comportant pas de mise en solution et/ou trempe suite à la formation des couches, c'est-à-dire suite à la formation de la pièce finale, ou suite au traitement thermique post-fabrication.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il est réalisé à une température de préchauffage T allant jusqu'à 500°C.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le métal d'apport prend la forme d'une poudre (15), dont l'exposition à un faisceau de lumière (12) ou de particules chargées résulte en une fusion localisée suivie d'une solidification, de façon à former une couche solide (20₁...20_n).
10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel le métal d'apport est issu d'un fil d'apport (35), dont l'exposition à une source de chaleur (32) résulte en une fusion localisée suivie d'une solidification, de façon à former une couche solide (20₁...20_n).
11. Pièce métallique obtenue par un procédé objet de l'une quelconque des revendications précédentes.
12. Poudre, destinée à être utilisée en tant que matériau d'apport d'un procédé de fabrication additive, caractérisé en ce qu'elle est constituée d'un alliage d'aluminium, comportant les éléments d'alliage suivants (pourcentages massiques) :
 - au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zr, Hf, Sc et Er, selon une fraction massique de 0,01 à 1,60 %, de préférence de 0,03 à 1,50 %, de préférence de 0,05 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,20 à 1,25 %, de préférence de 0,30 à 1,20 %, de préférence de 0,40 à 1,00 %, de préférence de 0,50 à 0,90 %, de préférence de 0,60 à 0,80 % chacun et au total ;
 - Fe, selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 3,00 %, de préférence de 0,30 à 3,00 %, de préférence de 0,40 à 3,00 %, de préférence de 0,50 à 2,90 %, de préférence de 0,60 à 2,80 %, de préférence de 0,70 à 2,70 %, de préférence de 0,80 à 2,70 %, de préférence de 0,90 à 2,60 %, de préférence de 0,90 à 2,50 %, de préférence de 0,90 à 2,40 %, de préférence de 0,90 à 2,30 %, de préférence de 0,90 à 2,20 % ;

- Cr, selon une fraction massique de 0,50 à 4,00 %, de préférence de 0,70 à 4,00 %, de préférence de 1,00 à 4,00 %, de préférence de 1,30 à 3,90 %, de préférence de 1,50 à 3,80 %, de préférence de 1,60 à 3,70 %, de préférence de 1,70 à 3,60 %, de préférence de 1,75 à 3,50 %, de préférence de 1,75 à 3,40 %, de préférence de 1,75 à 3,30 %, de préférence de 1,75 à 3,20 %, de préférence de 1,80 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,20 %, de préférence de 1,90 à 3,00 %, de préférence de 1,90 à 2,50 %, de préférence de 1,90 à 2,20 % ;
- Mg, selon une fraction massique de 0,01 à 3,50 %, de préférence de 0,03 à 3,50 %, de préférence de 0,05 à 3,50 %, de préférence de 0,10 à 3,40 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,80 %, de préférence de 0,50 à 1,50 %, de préférence de 0,50 à 1,20 % ;
- optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Mn, V et Ti selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 %, chacun et au total ;
- optionnellement Mo, selon une fraction massique supérieure ou égale à 0,03 %, de préférence supérieure ou égale à 0,05 %, de préférence de 0,10 à 3,00 %, de préférence de 0,20 à 2,50 %, de préférence de 0,30 à 2,40 %, de préférence de 0,40 à 2,30 %, de préférence de 0,40 à 2,20 %, de préférence de 0,40 à 2,10 %, de préférence de 0,40 à 2,00 %, de préférence de 0,40 à 1,90 %, de préférence de 0,40 à 1,80 %, de préférence de 0,40 à 1,70 %, de préférence de 0,40 à 1,60 %, de préférence de 0,40 à 1,20 % ;
- optionnellement Si, selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,20 %, de préférence inférieure ou égale à 0,15 %, de préférence inférieure ou égale à 0,10 % ;
- optionnellement Ni, selon une fraction massique inférieure ou égale à 3,00 %, de préférence inférieure ou égale à 2,50 %, de préférence inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 % de préférence inférieure ou égale à 0,50 % ;
- optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Cu et Ag,

- selon une fraction massique de 0,05 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Cu ;
- 5 selon une fraction massique de 0,05 à 3,00 %, de préférence de 0,10 à 2,00 %, de préférence de 0,10 à 1,60 %, de préférence de 0,10 à 1,50 %, de préférence de 0,10 à 1,40 %, de préférence de 0,10 à 1,30 %, de préférence de 0,10 à 1,20 %, de préférence de 0,10 à 1,10 %, de préférence de 0,10 à 1,00 %, de préférence de 0,10 à 0,90 %, de préférence de 0,10 à 0,80 % de préférence de 0,10 à 0,70 % pour Ag et au total ;
- 10 - optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Zn et Li, selon une fraction massique inférieure à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 % chacun et au total ;
- optionnellement au moins un élément d'alliage choisi parmi : Co, La, Ce, mischmétal, W, Ta, Nb, Nd, Y, Tm, Lu, Yb, Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In et Sn, selon une fraction massique
- 15 inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,50 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, préférentiellement inférieure ou égale à 0,50 %, plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,30 %, encore plus préférentiellement inférieure ou égale à 0,10 % chacun, et inférieure ou égale à 2,00 %, de préférence inférieure ou égale à 1,00 %, de préférence inférieure ou égale à 0,50 %, de préférence inférieure ou égale à 0,30 % au total ;
- 20 - impuretés : < 0,05 % individuellement, et de préférence < 0,15 % au total ;
reste aluminium.
13. Utilisation d'une poudre selon la revendication 12, dans un procédé de fabrication additive
- 25 choisi parmi : la fusion laser sur lit de poudre, la fusion par faisceau d'électrons (electron beam melting), la pulvérisation à froid, le dépôt par fusion laser, la fabrication additive par friction, le frittage par étincelle au plasma et le soudage par friction rotative, de préférence la fusion laser sur lit de poudre.