

Développement des alliages d'aluminium en fusion laser sur lit de poudre

La fusion laser sur lit de poudre (PBF-LB) fait partie des procédés les mieux maîtrisés et présentant un TRL élevé (niveau de maturité technologique) en fabrication additive. Depuis quelques années, on voit arriver sur le marché de nouveaux matériaux métalliques en PBF-LB notamment des alliages d'aluminium. Ces matériaux sont d'ailleurs plus ou moins optimisés pour ce type de procédé. Il apparaît donc intéressant de réaliser un premier état des lieux.

1. CONTEXTE

La fusion laser sur lit de poudre (PBF-LB) d'alliages d'aluminium présente certaines spécificités liées au matériau. Ainsi, il est connu que les poudres d'alliages d'aluminium montrent^[1-3] :

- Une réflectivité laser élevée
- Un oxyde de surface (alumine) tenace
- Une mauvaise aptitude à l'étalement de la poudre (en partie en raison de sa faible densité)
- Une conductivité thermique élevée
- Un large intervalle de fusion (pour certains alliages d'aluminium)

D'autre part, les alliages d'aluminium corroyés présentent de bonnes propriétés mécaniques, notamment grâce au phénomène de durcissement par précipitation, tels que la série 2000 (base Al-Cu), la série 6000 (base Al-Mg-Si) et la série 7000 (base Al-Zn-Mg), ont une mauvaise aptitude au soudage. Cela les rend mal adaptés au procédé de PBF-LB où les cordons de fabrication sont obtenus par fusion.

Le problème de mise en œuvre de ces alliages en PBF-LB est la fissuration à chaud. Les alliages de la série 7000 (notamment ceux chargés en cuivre), de nombreux alliages de la série 6000 et les alliages de la série 2000 (à quelques rares exceptions près) sont bien connus pour leur grande sensibilité à la fissuration à chaud. Le principal facteur de sensibilité d'un alliage à la fissuration à chaud est sa composition chimique^[4].

Pour les alliages d'aluminium, le point essentiel est leur aptitude au procédé de PBF-LB. Cela se traduit principalement par leur sensibilité à la fissuration à chaud mais également par des problèmes d'évaporation d'éléments chimiques^[1, 4] (Zn, Mg) provoquant des scories ou des fumées.

La **figure 1** présente un exemple de fissuration à chaud sur l'alliage 2017A mis en œuvre par PBF-LB. On note sur les micrographies avec attaque (**figure 1** au centre) les cordons et l'orientation des grains. Les cordons de construction sont visibles sous forme de « vagues ». À l'intérieur des cordons, on distingue les grains de l'alliage. Ceux-ci se développent le long des trajectoires orthogonales aux isothermes conformément aux lois de la solidification^[5]. Ainsi, les grains sont orientés perpendiculairement à la tangente du bord des cordons.

La fissuration (à chaud) de solidification se produit dans le métal fondu dans les espaces interdendritiques où la ségrégation est particulièrement importante^[5].

La fissuration se produit en fin de solidification, lorsque les cristaux en cours de croissance sont encore séparés par un liquide interdendritique. À ce stade, en effet, les retraits deviennent très importants : le passage du liquide au solide s'accompagne d'une forte contraction, au moment où, la solidification n'étant pas achevée, des films liquides séparent encore les grains. N'offrant aucune résistance au cisaillement, ces films, s'ils sont suffisamment étendus, permettent la séparation des grains sous l'effet de la contraction du métal en cours de solidification^[5-7].

Les observations MEB-FEG (**figure 1c**) confirment la fissuration interdendritique. La vitesse de solidification étant très rapide en PBF-LB (environ 105°C/s) les dendrites de solution solide sont très fines^[8]. À fort grossissement, on note que les fissures laissent apparaître des ensembles de fines dendrites bien dessinées.

Pour les différentes raisons énoncées précédemment, les alliages d'aluminium disponibles sur le marché de la PBF-LB (poudres et paramètres machines) sont, à l'origine, limités aux alliages de fonderie de type Al-Si. En effet, ces alliages sont facilement soudables, insensibles à la fissuration à chaud et présentent une bonne coulabilité. Dès lors, ils sont donc facilement mis en œuvre en PBF-LB^[9].

Cependant, les industriels ont des besoins en termes de propriétés mécaniques, d'état de surface, de traitements de surface qui conduisent les fabricants et offreurs de solutions à s'orienter vers trois voies d'étude :

- la recherche et l'optimisation d'alliages existants aptes à la PBF-LB,
- la modification d'alliages connus,
- la conception de nouveaux alliages destinés à la PBF-LB.

2. OFFRE « STANDARD » EN PBF-LB POUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Comme indiqué précédemment, l'offre « standard » correspond aux alliages d'aluminium issus de fonderie type Al-Si et majoritairement représentés par les deux alliages AlSi10Mg et AlSi7Mg0,6 que nous verrons plus en

Auteur principal
Arnold Mauduit,
expert « fellow »
aluminium et matériaux
légers, Cetim

Co-auteur
Pierre Auguste,
ingénieur R&D, Cetim

détail, plus loin. Il existe également des alliages moins courants comme l'AlSi12 et l'AlSi9Cu3 qui se mettent en œuvre par PBF-LB.

En effet, ils présentent un taux important de silicium dont l'ajout permet d'éviter la fissuration à chaud et de conférer de bonnes propriétés de soudabilité et de coulabilité. Ils présentent une faible aptitude aux traitements thermiques (à part pour l'AlSi7Mg0,6). Le taux de Si important limite l'allongement.

Cependant, leurs propriétés mécaniques sont correctes et supérieures à ce que l'on peut attendre en fonderie. Outre l'impact sur les caractéristiques mécaniques, le taux important de Si dans ces alliages réduit considérablement leur aptitude à l'anodisation (notamment de décoration) et au polissage chimique. Les préparations de surface avant anodisation restent complexes. Ces alliages qui correspondent à l'offre « standard » sont commercialisés par de nombreux constructeurs de machine et sont très largement disponibles sur le marché des poudres. Leurs coûts sont de l'ordre de 35 à 50 €/kg.

2.1. L'alliage AlSi10Mg

Cet alliage est initialement prévu pour la mise en œuvre par moulage. La teneur en Si donne à cet alliage une composition proche de l'eutectique et lui confère d'excellentes propriétés de fonderie (notamment une bonne coulabilité). La présence de Mg rend possible le traitement thermique^[10].

En PBF-LB, c'est l'alliage historique : il est le premier alliage d'aluminium à avoir été mis en œuvre par ce procédé (pour sa facilité notamment) et à être fourni en poudre pour cette application. C'est également l'un des rares alliages d'aluminium présent dans des normes de fabrication additive.

On a noté deux normes cadrant l'alliage : la VDI 3405 (partie 2.1) et l'ASTM F338. Dans ces documents, on trouve des critères de conformité portant sur la composition chimique, sur les caractéristiques mécaniques statiques (R_m , $R_{p0,2}$, $A\%$), sur la dureté et sur l'état de surface (rugosité) de l'alliage après mise en œuvre par PBF-LB et après certains traitements thermiques.

Il existe une littérature conséquente sur l'étude de l'AlSi10Mg en PBF-LB^[11] : sur sa mise en œuvre, sur la microstructure de l'alliage brut de fabrication et après traitements thermiques, sur la mise au point de traitements thermiques pour optimiser les caractéristiques mécaniques et le détensionnement ou encore sur le comportement en fatigue.

2.2. L'alliage AlSi7Mg0,6

En fonderie, l'alliage AlSi7Mg0,6 (aussi désigné A357 selon ANSI) présente de hautes propriétés mécaniques. La teneur en Si, moyenne, permet l'obtention d'excellentes propriétés de fonderie, et la teneur en Mg rend possibles les traitements thermiques T6.

En PBF-LB, cet alliage est apparu après l'AlSi10Mg. Cependant, ces dernières années, il tend à le remplacer notamment pour ses meilleures caractéristiques mécaniques, et du fait de son utilisation dans le secteur aéronautique.

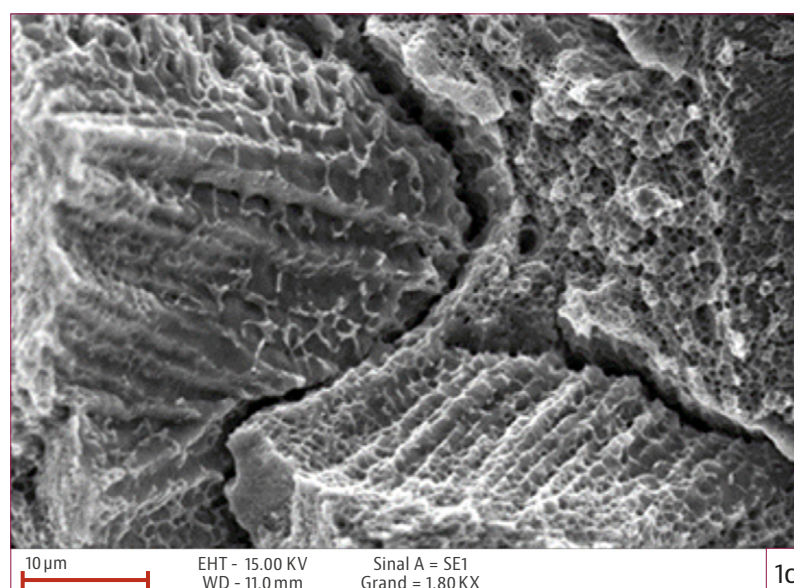
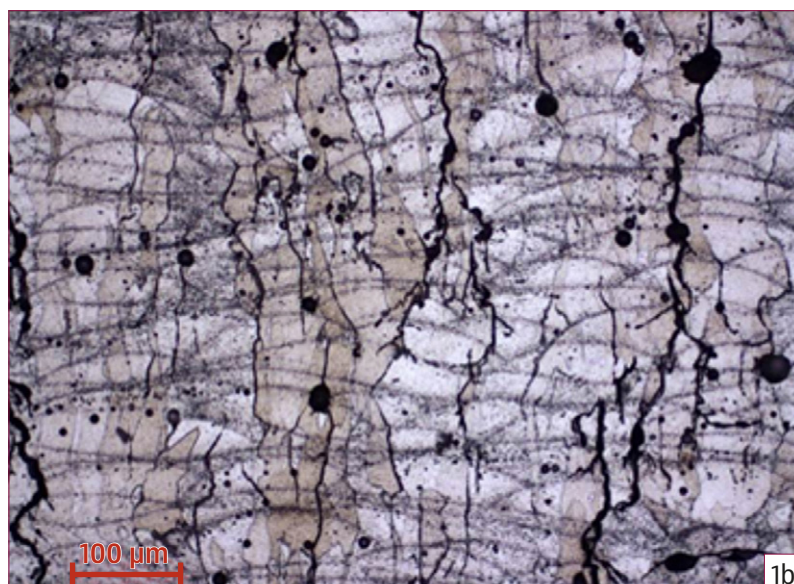
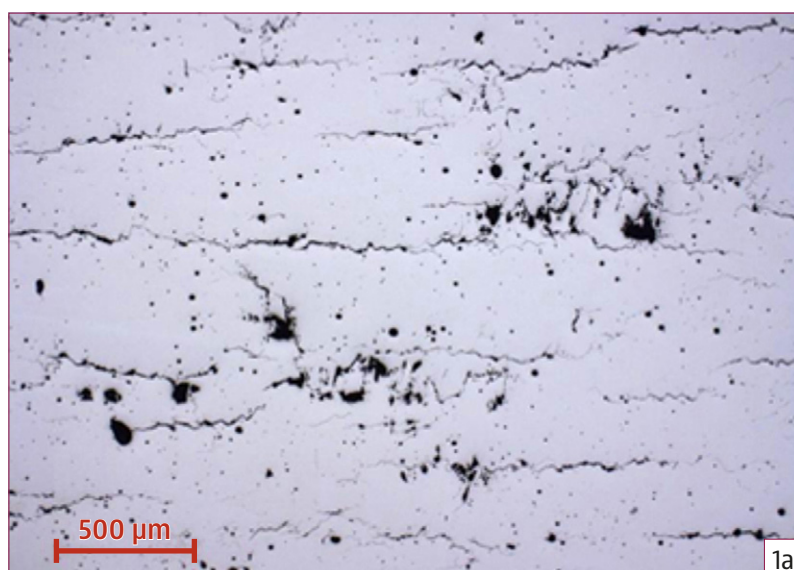


Figure 1.

Alliage 2017A – **1a** : observations micrographiques sans attaque, **1b** : avec attaque et **1c** : observations MEB-FEG^[8].

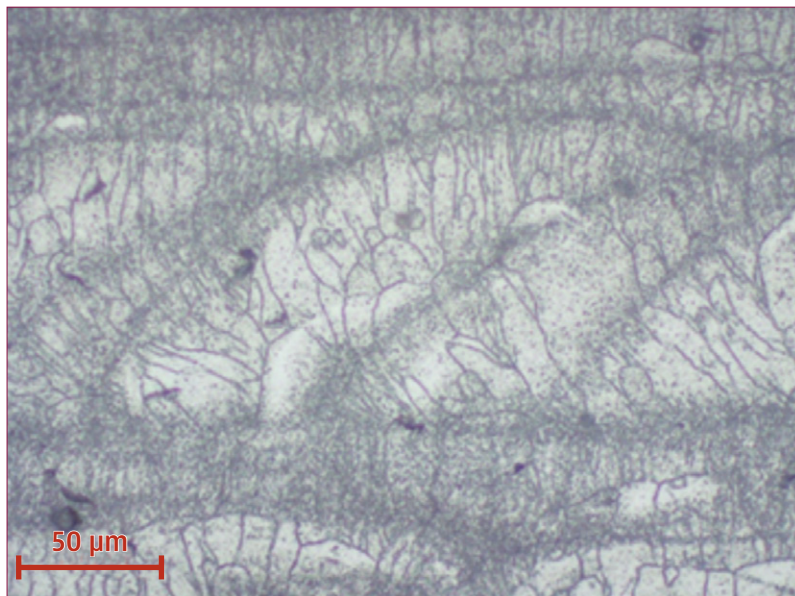


Figure 2.
Exemple de l'alliage
AlMg14 : pas de
fissuration^[4].
Observation des
cordons et des grains
de l'alliage.

L'alliage AlSiMg0,6 comme son homologue l'AlSi10Mg, a fait l'objet de nombreuses études en PBF-LB^[12] comme l'optimisation des conditions opératoires, les post-traitements thermiques, la microstructure et les caractéristiques mécaniques, le comportement en fatigue, l'état de surface ou les applications.

3. OPTIMISATION D'ALLIAGES EXISTANTS

Dans cette voie, on trouve notamment les alliages d'aluminium hypersiliés, utilisés pour des applications où l'on recherche une bonne tenue à chaud, associée à un coefficient de dilatation faible et à un bon comportement au frottement et à l'usure.

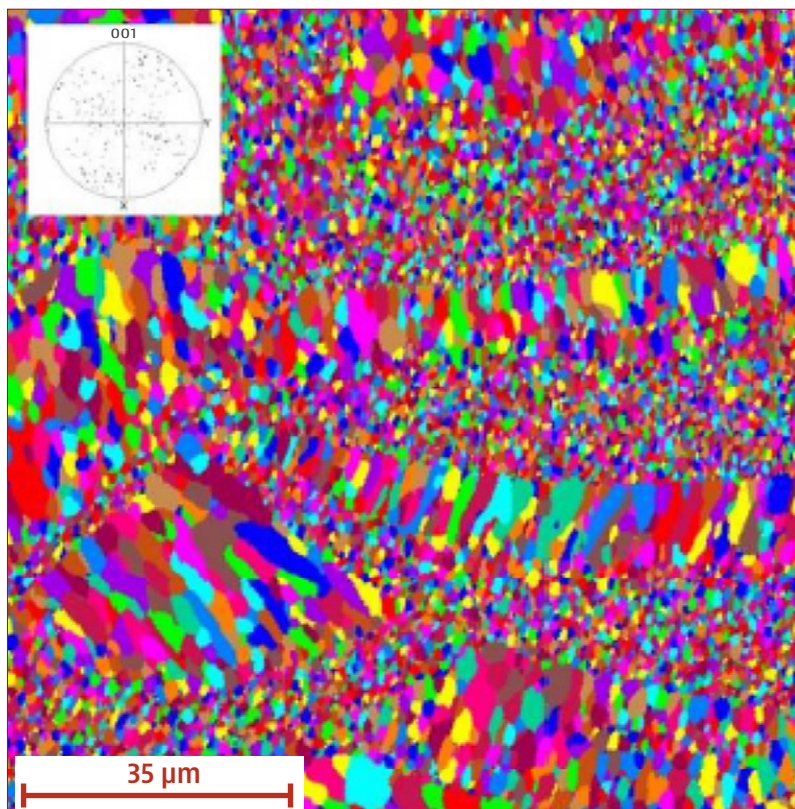


Figure 3.
Carte EBSD présentant
des zones à grains
très fins dues à
l'affinage au Zr selon^[1].

Ce type d'alliage est proposé en poudre pour le procédé de PBF-LB par la société Gränges^[13] sous le nom commercial « DISPAL ». On trouve ainsi des alliages de type AlSi35, AlSi40, AlSi25Cu4Mg, souvent utilisés dans le secteur de l'optique (par exemple des supports de miroir) pour leur stabilité dimensionnelle en température et en vibration. Des études se tournent également vers des alliages de type Al-Si-Cu pour leur capacité de traitement thermique et ainsi utiliser l'état T6 offrant des caractéristiques mécaniques plus intéressantes. On note notamment l'alliage AlSi5Cu3Mg^[14]. Enfin, les développements d'alliages de type Al-Mg (ou série 5000) ont également été envisagés (figure 2).

Les alliages Al-Mg développés par Fehrmann Alloys, tels que : AlMgty80 (9 – 11% de Mg) et AlMgty90 (11 – 14% de Mg)^[15], présentent une faible sensibilité à la fissuration à chaud et une bonne soudabilité, surtout avec un taux de Mg élevé. Lors du procédé de PBF-LB, le Mg s'évapore, nécessitant une augmentation de sa teneur dans l'alliage de départ (poudre). Ces alliages visent à :

- Améliorer les caractéristiques mécaniques par rapport à l'AlSi10Mg, notamment l'allongement à rupture.
- Offrir une bonne résistance à la corrosion, y compris en milieu marin.
- Faciliter les traitements de surface comme le polissage chimique et l'anodisation, y compris l'anodisation colorée.

Grâce à leur teneur élevée en magnésium, ces alliages ont une faible masse volumique et des caractéristiques mécaniques proportionnelles à la teneur en Mg. Cependant, ils peuvent être sensibles à la corrosion intercrystalline et sous contrainte dans des environnements agressifs, surtout à des températures prolongées au-dessus de 65–80°C^[16].

4. MODIFICATION D'ALLIAGES EXISTANTS

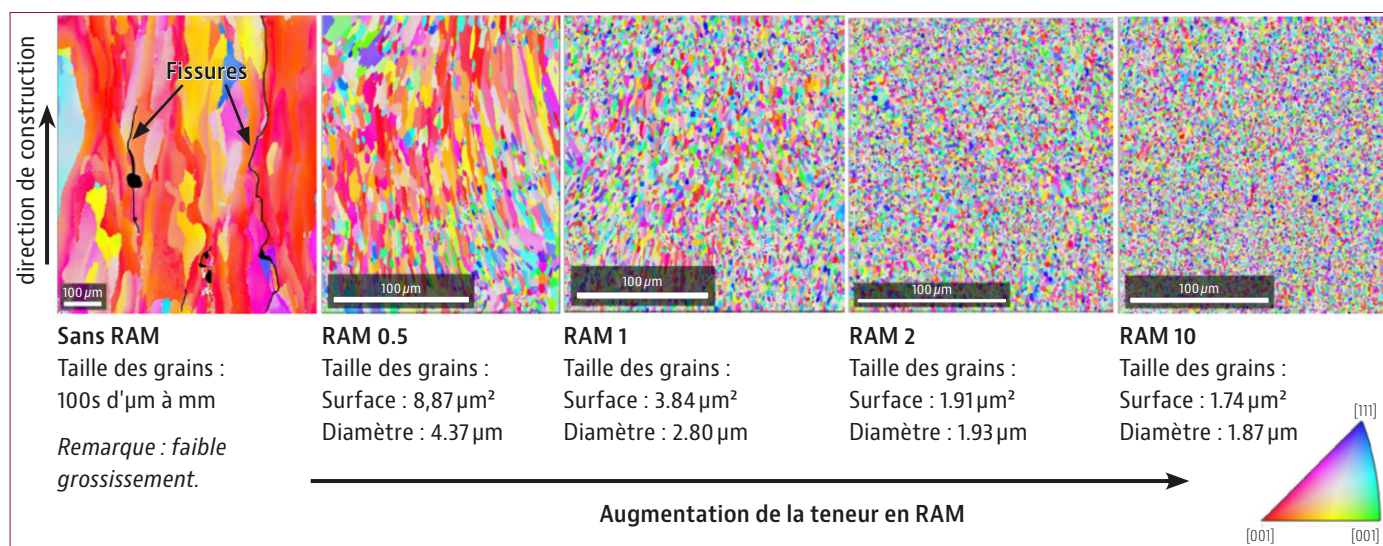
Comme indiqué précédemment, la problématique pour certains alliages est leur inaptitude en PBF-LB du fait du phénomène de fissuration à chaud essentiellement lié à la composition chimique de l'alliage. Ainsi, plusieurs solutions sont apparues dans la littérature.

4.1. Par ajout de Si

Ainsi, dans la littérature^[17], une solution simple et efficace est mise en œuvre pour modifier un alliage 7075 sensible à la fissuration à chaud en un alliage apte au procédé de PBF-LB, en ajoutant du Si. Comme on l'a vu, le Si améliore la coulabilité et réduit la fissuration à chaud : la modification de l'alliage et sa nouvelle aptitude en PBF-LB est expliqué dans^[4]. À l'heure actuelle, cette voie n'a pas été exploitée pour commercialiser de nouveaux alliages aptes en PBF-LB.

4.2. Par ajout de Zr

Une autre option étudiée est d'utiliser l'ajout de Zr dans l'alliage à modifier. Le Zr forme avec l'aluminium un intermétallique bien connu l'Al₃Zr qui fait partie des dispersoïdes usuels. Celui-ci agit comme un agent de nucléation pendant le processus de solidification ; ainsi la



fissuration à chaud est réduite par la méthode d'affinage de la taille de grain. Depuis longtemps, le Zr est utilisé dans les alliages commerciaux pour réduire la taille de grain. Cette option s'est avérée prometteuse pour les alliages 7075, 7050, 2024, 6061...^[18-21].

Mais c'est avec la famille des Al-Mg que cette technique a trouvé un débouché commercial avec la mise sur le marché des alliages Addaloy^[22] de la société NanoAl (USA). D'ailleurs, l'ajout de Zr dans les alliages Al-Mg^[23] permet de créer deux types de précipités :

- Des précipités (dispersoïdes) d'Al₃Zr formés lors de la solidification et dont le but est d'affiner la taille de grains (Figure 3).
- Des nano-précipités d'Al₃Zr formés lors du vieillissement ultérieur (par traitement thermique) de la matrice Al-Mg-Zr sursaturée et dont le rôle est le durcissement structural (durcissement par précipitation)^[1].

4.3. Par ajout de Sc (en complément de Zr)

En complément du Zr dans les alliages Al-Mg, il est possible d'ajouter du Sc impliquant non seulement la bonne aptitude de ces alliages au procédé de PBF-LB mais augmentant encore de façon significative les caractéristiques mécaniques, notamment après vieillissement de l'alliage. Cette voie d'étude a conduit à une composition chimique très prometteuse brevetée sous le nom de Scalmalloy^[24] (société APWORKS). Les propriétés mécaniques élevées de cet alliage sont principalement dues à la précipitation de phases cohérentes d'Al₃(Sc,Zr) (durcissement par précipitation) et à l'effet de renforcement du Mg dans la solution solide^[25].

4.4. Par ajout d'agent d'affinage de Ti+B (ou Ti+C, Ti+N)

Outre l'ajout de Zr et/ou de Sc, il existe d'autres techniques d'affinage du grain comme l'introduction d'agent d'affinage de type Ti+B.

Dans ce cas, l'agent d'affinage permet la formation de particules de TiB₂ qui agissent comme de nombreux sites de nucléation^[26]. D'autres agents d'affinage ont été étudiés, tels que Ti+C, Ti+N; mais le Ti+B reste le

plus efficace et le plus utilisé (traditionnellement). Ainsi, l'alliage A20X^[27], détenu et distribué par la société Aluminium Materials Technologies Ltd (UK) repose sur l'ajout de particules céramiques de TiB₂ pour prévenir les problèmes de fissuration à chaud de cet alliage développé initialement pour la fonderie (dans les années 1990) mais qui souffrait déjà de problème de fissuration à chaud. De même, la société Elementum3D (USA) propose les alliages 2024, 6061 et 7050 avec une addition de Ti et de B₄C afin de réduire la taille de grain de ces alliages et de les rendre aptes au procédé de PBF-LB. Ce procédé développé par Elementum 3D^[28] dénommé « Reactive Additive Manufacturing » (RAM) utilise une réaction chimique exothermique pendant la fusion. Les renforts céramiques servent de sites de nucléation pendant la solidification de l'alliage pour produire des microstructures d'aluminium équiaxes à grains fins. En produisant une fine microstructure équiaxe, le procédé surmonte les problèmes de fabrication dus à la fissuration à chaud qui affecte de nombreux alliages d'aluminium et offre des propriétés mécaniques presque isotropes (Figure 4).

5. CONCEPTION DE NOUVEAUX ALLIAGES

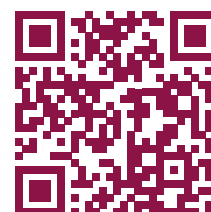
La conception de nouveaux alliages signifie le développement d'alliages destinés spécifiquement au procédé de PBF-LB. Ainsi, l'exemple typique est le nouvel alliage proposé par Constellium. L'alliage Aheadd® CP1 (désigné AA 8A61.50)^[29] est un alliage d'aluminium avec 1% de Fe et 1% de Zr, mettant à profit les caractéristiques du procédé PBF-LB.

Contrairement à beaucoup d'alliages qui requièrent une mise en solution, trempe et revenu après fabrication, l'alliage utilise la solidification rapide en PBF-LB pour atteindre un état stable avec des contraintes résiduelles faibles. Il offre de bonnes propriétés mécaniques, thermiques, de résistance à la corrosion et de compatibilité avec les traitements de surface (comme l'anodisation), sans nécessiter de traitements post-fabrication complexes. Un simple traitement thermique de 4 heures à 400°C suffit pour atteindre sa résistance finale, ce qui le rend idéal pour diverses applications industrielles.

Figure 4.

Exemple d'impact du procédé RAM sur un alliage d'aluminium sensible à la fissuration à chaud^[28].

Retrouvez cet article ainsi que toute nos archives



traitementsetmatériaux.fr

En résumé, l'alliage Ahead® CP1 présente comme propriétés :

- Pas d'éléments volatils tels que Zn et Mg
- Bonne productivité (taux de construction > 50cm³/h avec paramétrie adéquate)
- Peu de fumée
- Post traitement-thermique simple (pas de mise en solution / trempe)
- Bonne stabilité thermique (jusqu'à 260°C)
- Possibilité d'anodisation

6. CONCLUSION

À travers cette revue des développements de nouveaux alliages d'aluminium employés en PBF-LB, on constate que le point essentiel est l'aptitude à la mise en œuvre de l'alliage en PBF-LB. Pour les alliages d'aluminium, cela se traduit principalement par leur sensibilité à la fissuration à chaud. Ainsi, les fabricants ou offreurs de solution ont mis en œuvre des moyens pour proposer des alliages aptes au procédé de PBF-LB. Chaque acteur a trouvé une voie propre pour parvenir à cet objectif. L'arrivée de nouveaux alliages d'aluminium en PBF-LB n'est finalement qu'un phénomène logique au regard des développements passés dans le domaine de l'aluminium : développement d'alliages pour la fonderie, par exemple pour la fonderie sous pression et même encore récemment avec les alliages Al-Si-Mn (Silafont 36 et 38, Castasil 37), ou même pour le décolletage (remplacement des alliages chargés au Pb, notamment). Il apparaît évident qu'un procédé comme PBF-LB présente de nombreux intérêts et va induire le développement d'alliages proposant différentes propriétés physico-chimiques et mécaniques répondant aux besoins industriels. ■

7. RÉFÉRENCES

1. CROTEAU, Joseph R., *et al.* Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Zr alloys processed by selective laser melting. *Acta Materialia*, 2018, vol. 153, p. 35-44.
2. OLAKANMI, Eytayo Olatunde, *et al.* Review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in materials science*, 2015, vol. 74, p. 401-477.
3. MERTENS, Anne I., *et al.* Fusion-based additive manufacturing for processing aluminum alloys: State-of-the-art and challenges. *Advanced Engineering Materials*, 2017, vol. 19, no 8.
4. MAUDUIT, Arnold, *et al.* Study of the suitability of aluminum alloys for additive manufacturing by laser powder bed fusion. *UPB Scientific Bulletin series B*, 2017, vol. 79, no 4, p. 219-238.
5. BOUCHER C., L'aluminium et ses alliages – soudabilité – métallurgie du soudage. *Publications du soudage et de ses applications*, 2000, 204 p.
6. MATHERS, Gene. *The welding of aluminium and its alloys*. Elsevier, 2002.
7. CROSS C. E., *et al.* *Aluminium welding. Handbook of aluminium*, volume 1, TOTTEN and MAC KENZIE, 2003, p. 481-532.
8. MAUDUIT, Arnold, *et al.* Application study of AlSi10Mg alloy by selective laser melting: physical and mechanical properties, microstructure, heat treatments and manufacturing of aluminium metallic matrix composite (MMC). *Metallurgical research & technology*, 2015, vol. 112, no 6, p. 605.
9. HYER, Holden, *et al.* Composition-dependent solidification cracking of aluminum-silicon alloys during laser powder bed fusion. *Acta Materialia*, 2021, vol. 208, p. 116698.
10. GARAT, Michel. *Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie*. Ed. Techniques Ingénieur 2012.
11. ZHAO, Lv, *et al.* Review on the correlation between microstructure and mechanical performance for laser powder bed fusion AlSi10Mg. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 56, p. 102914.
12. MEDRANO, Victor Adrian, *et al.* A comprehensive and comparative study of microstructure and mechanical properties for post-process heat treatment of AlSi7Mg alloy components fabricated in different laser powder bed fusion systems. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 24, p. 6820-6842.
13. En ligne accès juin 2025 : <https://www.granges.com/dispal/>.
14. MAUDUIT, Arnold, *et al.* A study of AlSi5Cu3Mg alloy produced by laser powder bed fusion: porosity assessment, microstructure, mechanical properties. *Mechanics & Industry*, 2023, vol. 24, p. 13.
15. En ligne accès juin 2025 : <https://www.fehrmann-materials.com/en/metal-powder>.
16. VARGEL, C. L'aluminium et la mer. *Matériaux & Techniques*, 1986, vol. 74, no 5-6, p. 233-245.
17. MONTERO-SISTIAGA, Maria L., *et al.* Changing the alloy composition of Al7075 for better processability by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 238, p. 437-445.
18. AVERSA, Alberta, *et al.* New aluminum alloys specifically designed for laser powder bed fusion: a review. *Materials*, 2019, vol. 12, no 7, p. 1007.
19. SCHUSTER, Marvin, *et al.* Precipitation in a 2xxx series Al-Cu-Mg-Zr alloy fabricated by laser powder bed fusion. *Materials & Design*, 2021, vol. 211, p. 110131.
20. NEZHADFAR, P. D., *et al.* Structural integrity of additively manufactured aluminum alloys: Effects of build orientation on microstructure, porosity, and fatigue behavior. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 47, p. 102292.
21. MERTENS, Raya, *et al.* Laser powder bed fusion of high strength aluminum. *Material Design & Processing Communications*, 2020, p. e161.
22. En ligne accès juin 2025 : <https://www.nanoal.com/addalloy-5t-powder> - <https://www.nanoal.com/addalloy-7s-powder> - <https://www.nanoal.com/addalloy-hx-powder>.
23. ZHOU, Le, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Zr-modified aluminum alloy 5083 manufactured by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 28, p. 485-496.
24. LEUSCHNER, R., *et al.* Scalmetalloy® = A unique high strength AlMgSc type material concept processed by innovative technologies for aerospace applications. In : *European Powder Metallurgy Association. Proceedings of the PM2010 Powder Metallurgy World Congress, 10th to 14th October*. 2010. p. 273-280
25. SPIERINGS, Adriaan Bernardus, *et al.* SLM-processed Sc-and Zr-modified Al-Mg alloy: Mechanical properties and microstructural effects of heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 701, p. 264-273.
26. CARLSSON, Sofia. Grain refinement of aluminium by titanium diboride particles: The importance of nucleation, growth restriction, and cooling rate. 2019.
27. En ligne accès juin 2025 : <https://www.eckart.net/en/a20x>.
28. En ligne accès juin 2025 : <https://www.elementum3d.com/aluminum/>.
29. MILLOT, Coraline, *et al.* Ahead® CP1: un alliage aluminium spécial fusion laser sur lit de poudre (L-PBF) performant en corrosion et traitements de surface. *Traitements et Matériaux*. N°489 - Septembre 2024.