

Les alliages d'aluminium en fusion laser sur lit de poudre (LPBF) : développements et applications.

9^{ème} école technologique du Réseau des Mécaniciens

Fabrication additive : Quelles finalités pour quels matériaux et procédés ?

Limoges 12 au 16 juin 2023

Arnold Mauduit

arnold.mauduit@cetim.fr



Choix de la technologie de fabrication

Fusion laser sur lit de poudre LPBF

- ▶ Technologie la plus mature actuellement
- ▶ Alliages d'aluminium disponibles : développements actifs de nouveaux alliages

- ▶ Points forts :

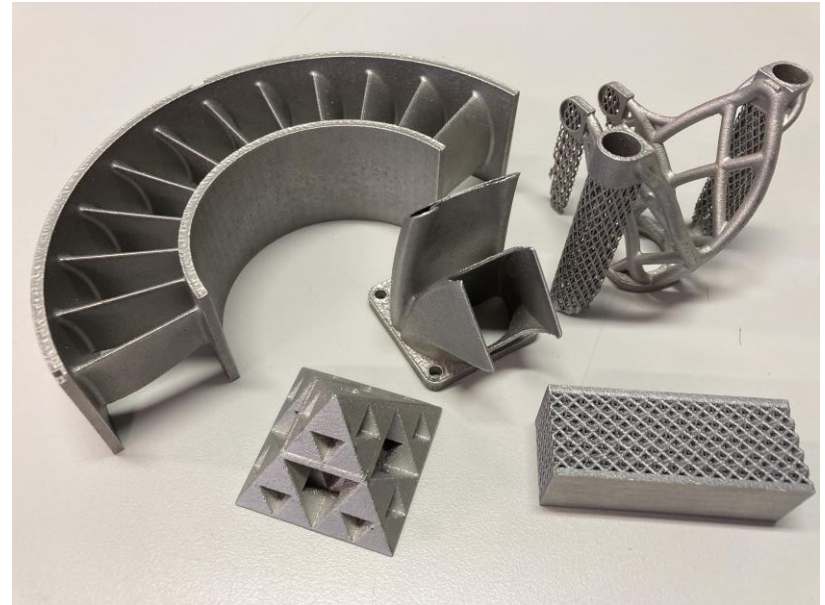
Géométries complexes / petites - moyennes séries

- ▶ Points faibles :

Faible productivité / états de surface

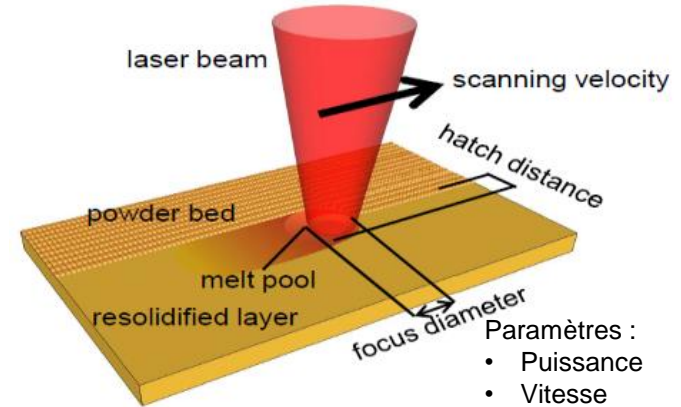
- ▶ Domaine d'application :

- Outillages
- Médical
- Aéronautique
- Spatial

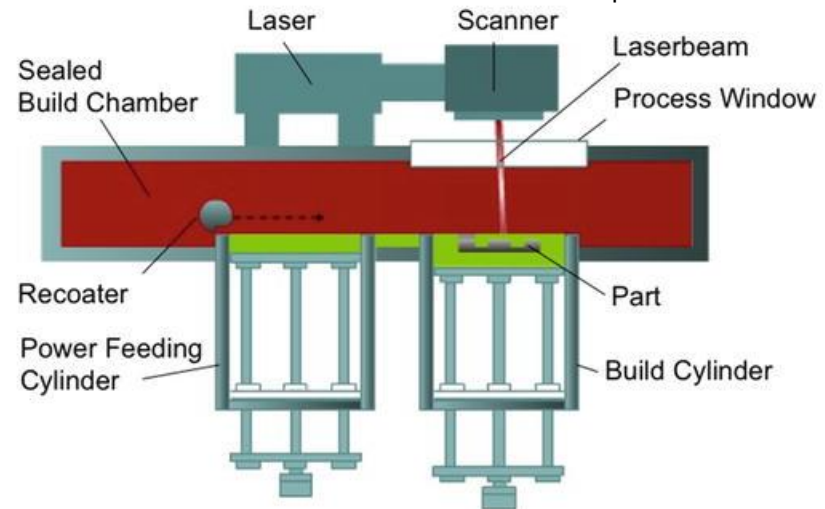


Description du procédé LPBF

- ▶ 1- Le plateau de fabrication descend d'une épaisseur de couche.
 - ▶ 2- Une nouvelle couche est appliquée sur le substrat au moyen d'une racle ou d'un rouleau.
 - ▶ 3- La poudre est lasée de sorte à fusionner sélectivement la section 2D de la pièce par absorption de l'énergie du laser.
-
- ▶ L'opération se fait dans une chambre sous atmosphère contrôlée (gaz inerte)
 - ▶ Laser fibre de plusieurs centaines de Watts
 - ▶ Le laser est dirigé suivant les directions X et Y au moyen de miroirs.



- Paramètres :
- Puissance
 - Vitesse
 - Ecartement trait laser
 - Epaisseur de couche



La problématique

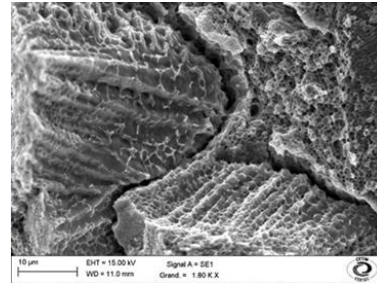
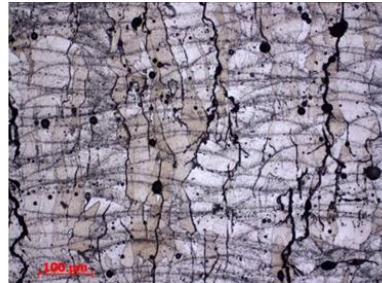
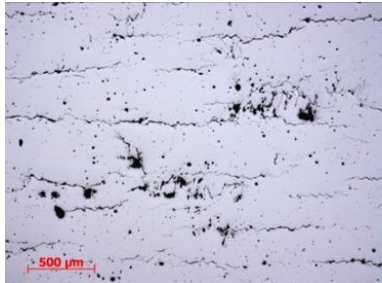
L'aptitude d'un alliage d'aluminium à la LPBF :

► Les poudres :

- 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)

► En outre les alliages d'aluminium peuvent présenter :

- Une sensibilité à la fissuration à chaud
- Des problèmes d'évaporation d'éléments chimiques (Zn, Mg, ...) : scories, fumées ...



Exemple de fissuration à chaud sur l'alliage 2017A mis en œuvre par LPBF : fissuration intergranulaire – interdendritique.

La problématique

Actuellement disponibles (sur le marché) alliages de fonderie type Al-Si :

- ▶ Soudables
- ▶ Insensibles à la fissuration à chaud
- ▶ Bonne coulabilité

⇒ **Les industriels ont besoin :**

- ▶ De propriétés mécaniques
- ▶ D'états de surface et de traitements de surface
- ▶ De productivité
- ▶ De facilité de mise en œuvre

Solutions suivant 3 voies de développement :

1. La recherche et l'optimisation d'alliages existants aptes à la LPBF
2. La modification d'alliages connus
3. La conception de nouveaux alliages destinés à la LPBF

L'offre « standard » alliage type Al-Si

AlSi10Mg

- ▶ Alliages historiques en LPBF
- ▶ Alliages normés en LPBF (VDI 3405 - partie 2.1 et l'ASTM F338)
- ▶ Nombreux documents dans la littérature

AlSi7Mg0,6

- ▶ Le plus courant – Remplace l'AlSi10Mg
- ▶ Bonnes propriétés mécaniques
- ▶ Nombreux documents dans la littérature

AlSi12 et AlSi9Cu3

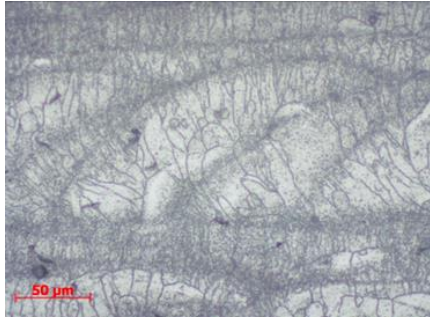
- ⇒ **Facilité de mise en œuvre en LPBF**
- ⇒ **Faible aptitude aux traitements thermiques (sauf AlSi7Mg0,6)**
- ⇒ **Problématique de préparations et de traitements de surface**

Les voies d'étude

Utilisation d'alliages existants

- ▶ Alliages de fonderie Al-Si-Cu
- ▶ Alliages de type Al-Mg

⇒ **Exemple des alliages commerciaux AlMgty80 et 90 (Fehrmann Alloys)**



Exemple de l'alliage AlMg14 : pas de fissuration

⇒ **Reste la problématique de l'évaporation du Mg**

Les voies d'étude

Modifications d'alliages existants

- ▶ Par ajouts de Si

Améliore la coulabilité et réduit la fissuration à chaud

Exemple : modification de l'alliage 7075

- ▶ Par ajout de Zr

Affinage taille de grain – réduction de la fissuration

Exemple : alliages commerciaux Addalloys (NanoAl)

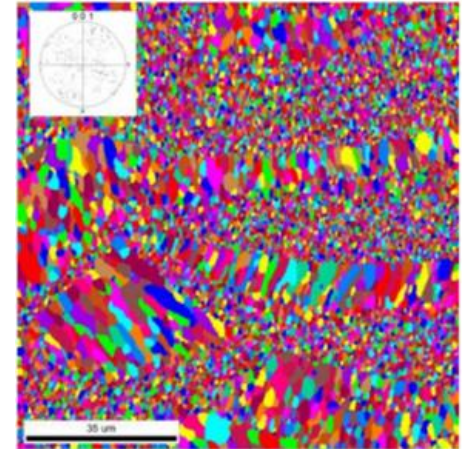
- ▶ Par ajout de Sc (en complément du Zr)

Exemple : Scalmetalloy (APWORKS)

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

Formation de particules TiB_2 => agents de nucléation

Exemple : A20X (Aluminium Materials Technologies)



Carte EBSD : zones à grains très fins dues à l'affinage du Zr

Les voies d'étude

Nouveaux alliages

⇒ **Conception de nouveaux alliages spécifiquement destinés à la LPBF**

Exemple : Aheadd CP1 et HT1 (Constellium)

Conclusion :

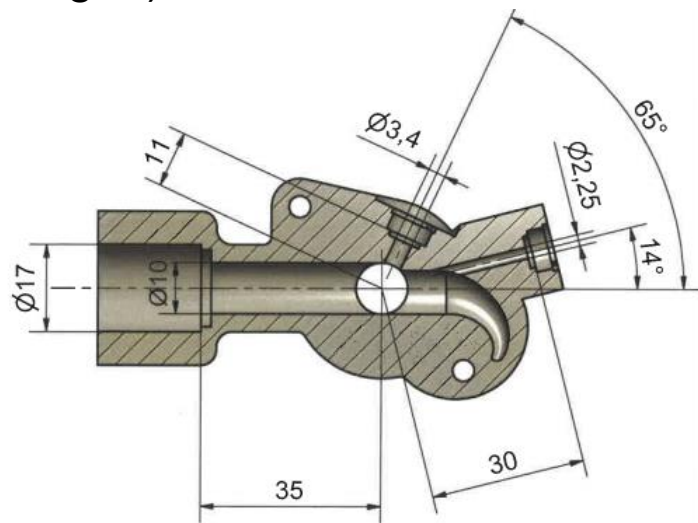
Arrivée de nouveaux alliages d'aluminium => phénomène logique au regard des développements passés dans le secteur aluminium (pour répondre aux besoins des industriels).

Un exemple d'application (avec le LPC2E)

Capteur de particules lonscape

- ▶ Réalisation du capteur en une seule pièce : difficultés de réalisation canaux intérieurs et piège de lumière (forme borgne).
- ▶ Maitrise de la qualité de la chambre optique.

- Bon état de surface : rugosité maximale (Ra visée $\leq 1,6 \mu\text{m}$)
- Présenter un noir profond pour éviter les réflexions (lumière – laser)
- Limiter l'utilisation de matériaux organiques (stabilité aux rayonnements)
- Résister aux variations de température (-50°C / $+160^{\circ}\text{C}$)



Réalisation des éprouvettes et prototypes

Préparation

☐ Choix des poudres

- AlSi7Mg0,6 : alliage bien maîtrisé
- AlMgty80 : alliage de type Al-Mg (alliage récent sur le marché)

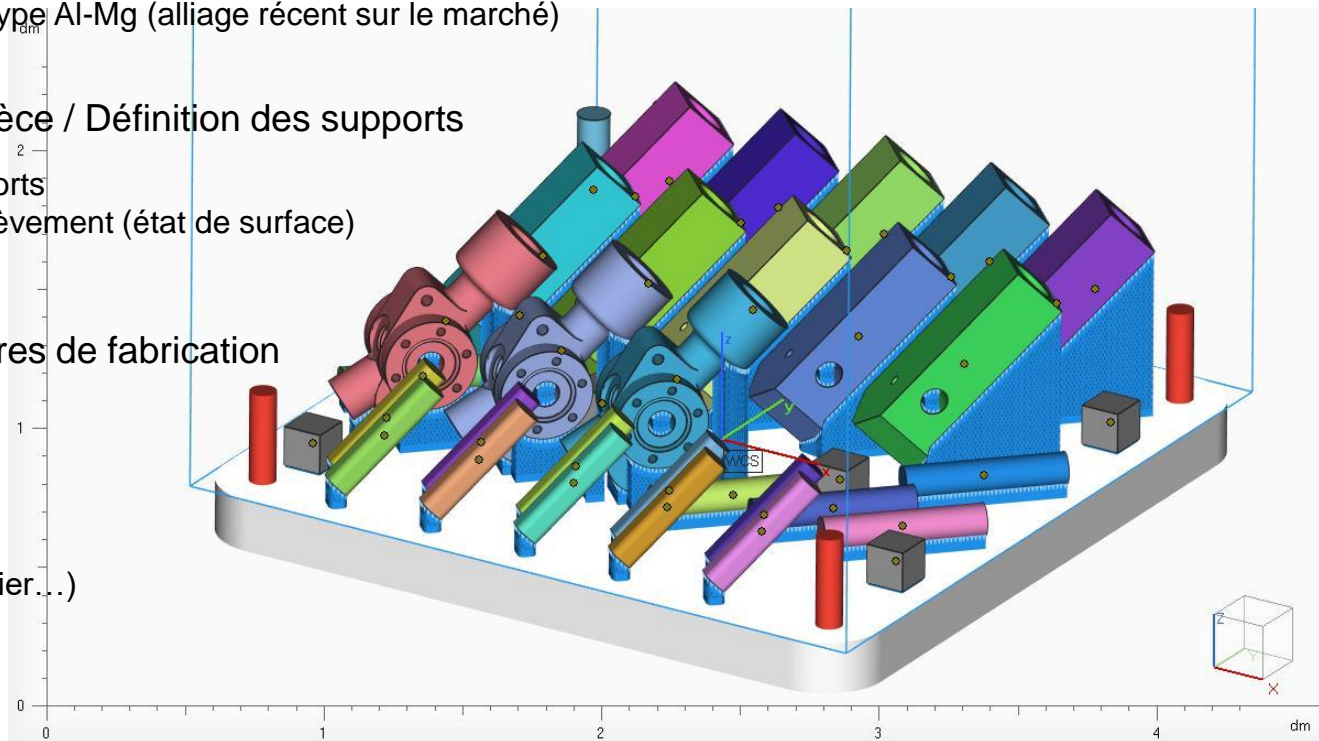
☐ Orientation de la pièce / Définition des supports

- Optimisation des supports
- Anticipation du parachèvement (état de surface)

☐ Choix des paramètres de fabrication

Ex paramètres :

- Ep couche
- Puissance laser
- Écart vecteur
- Paramètres exposition
- Stratégie (bande, damier...)



Réalisation des éprouvettes et prototypes

Fabrication et dépoudrage

Sur machine SLM 280 HL 700W

- Récupération des pièces :

Découpe des plateaux par scie à ruban

Nettoyage micro-billage (bille de verre)

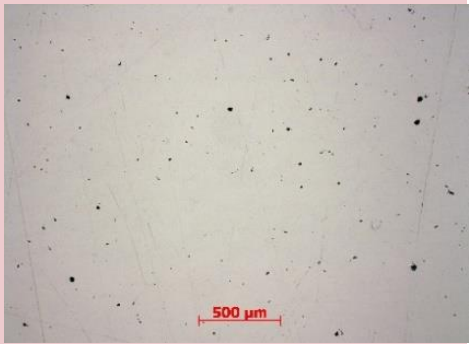
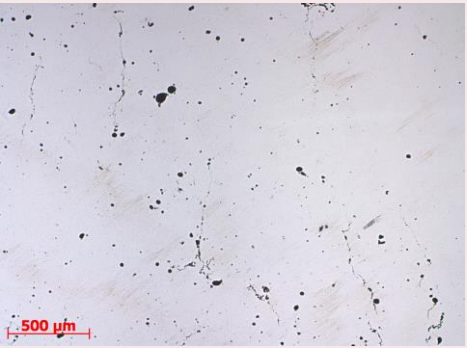
Paramètres de fabrication :



Alliages	Puissance (en W)	Vitesse (en mm/s)	Ecart vecteur (en μm)	Epaisseur de couche (en μm)	Densité d'énergie (en J/mm^3)	Vitesse de construction maximale (en cm^3/h)
AlSi7Mg0,6	650	2100	170	50	36,4	64,3
AlMgty80	350	1250	100	60	46,7	27

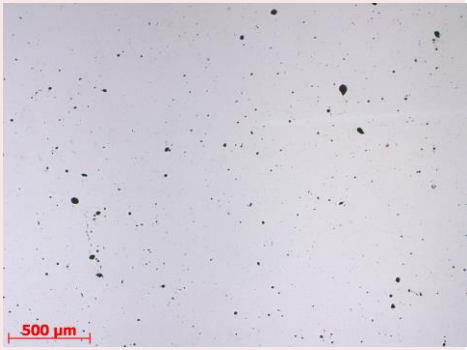
Caractérisation

Santé matière – brut de fabrication

Alliages	Taux de porosité (image)	Diamètre équivalent maximum	Observations
AlSi7Mg0,6	0,4±0,2%	108 µm	
AlMgty80 (Al-Mg)	1,9±0,6% (avec présence de petites fissures)	97 µm	

Caractérisation

Santé matière – après TTh

Alliages	Taux de porosité (image)	Diamètre équivalent maximum	Observations
AlSi7Mg0,6 Revenu (seul)	Pas d'évolution		
AlMgty80 (Al-Mg)	0,7±0,2% (réduction importante des petites fissures)	85,4 μm	

Caractérisation

Santé matière

▶ AlSi7Mg0,6

En pratique : utilisation de l'alliage à l'état brut de fabrication et/ou après revenu seul => pas de problème de santé matière.

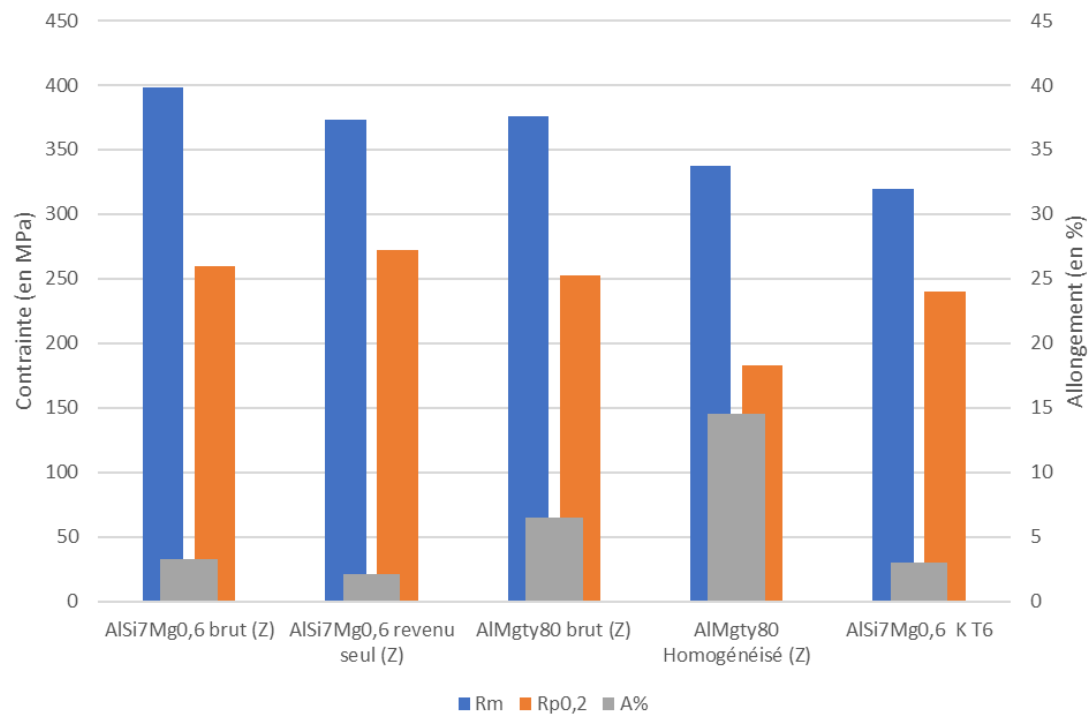
▶ AlMgty80 (Al-Mg)

En pratique : utilisation de l'alliage uniquement après TTh c'est-à-dire après homogénéisation / mise en solution (8h à 450°C).

Caractérisation

Dureté et caractéristiques mécaniques

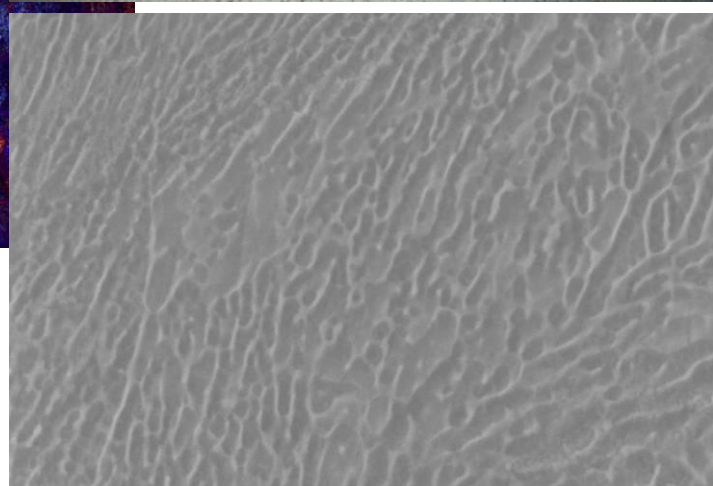
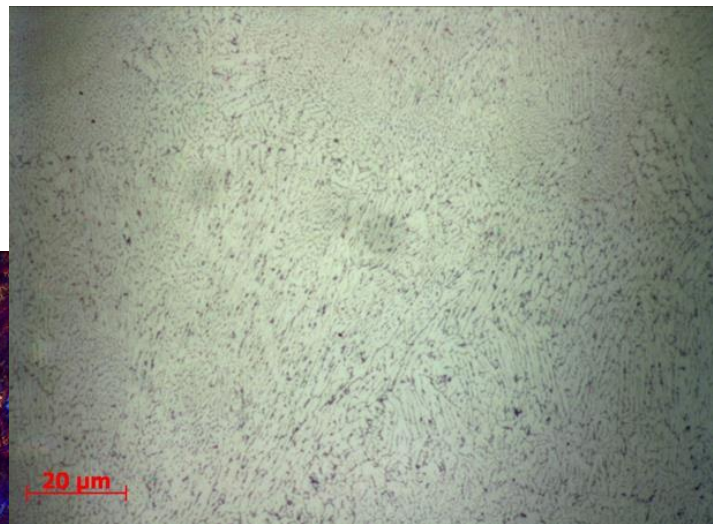
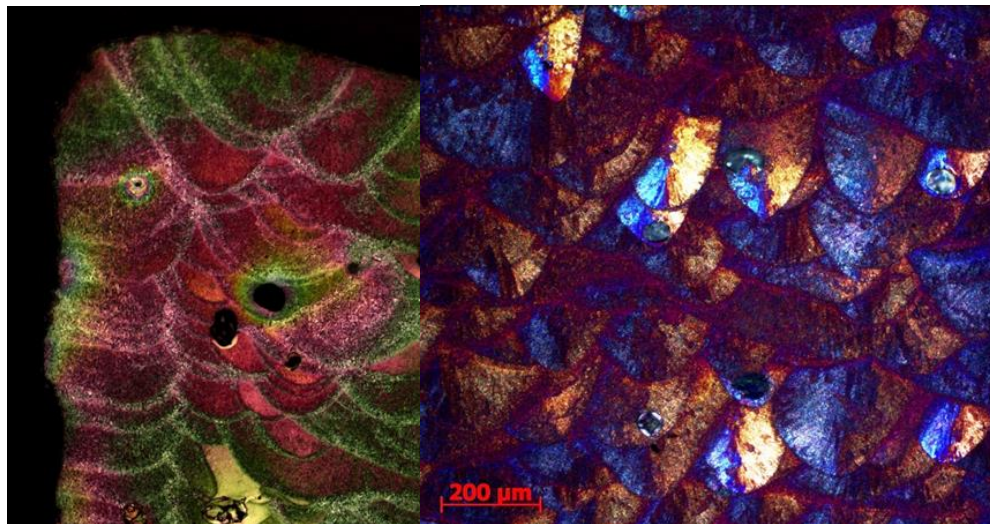
Alliages	Etats	Dureté HBW 5/250
AlSi7Mg0,6	Brut de fabrication	120,6±0,9
	Revenu seul	123,8±1,8
AlMgty (Al-Mg)	Brut de fabrication	112,6±1,2
	Homogénéisation / Mise en solution	93,5±2,3



Caractérisation

Structures métallurgiques

► AlSi7Mg0,6 brut de fabrication



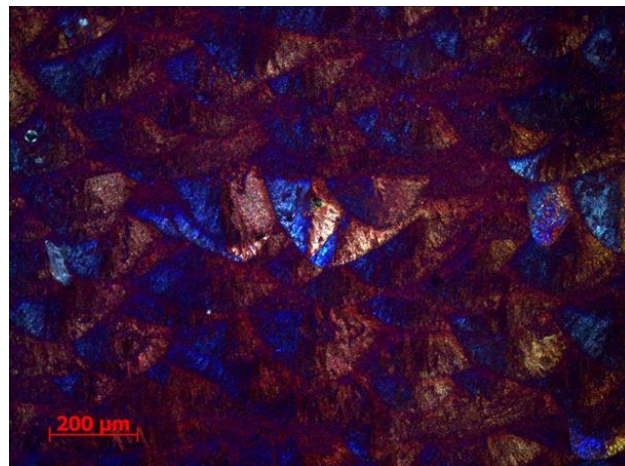
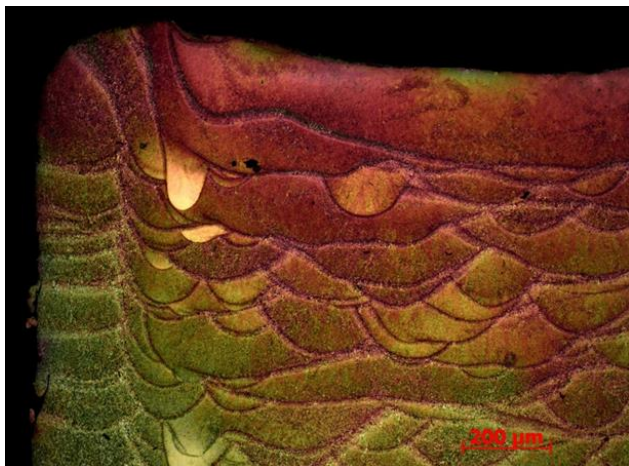
Mise en évidence :

- Des cordons de fabrication (à cœur et des contours)
- Des grains (orientés perpendiculaires au bordure des cordons)
- Dendrites de solution solide d'Al soulignées par l'eutectique (Al-Si)

Caractérisation

Structures métallurgiques

▶ AlSi7Mg0,6 revenu seul



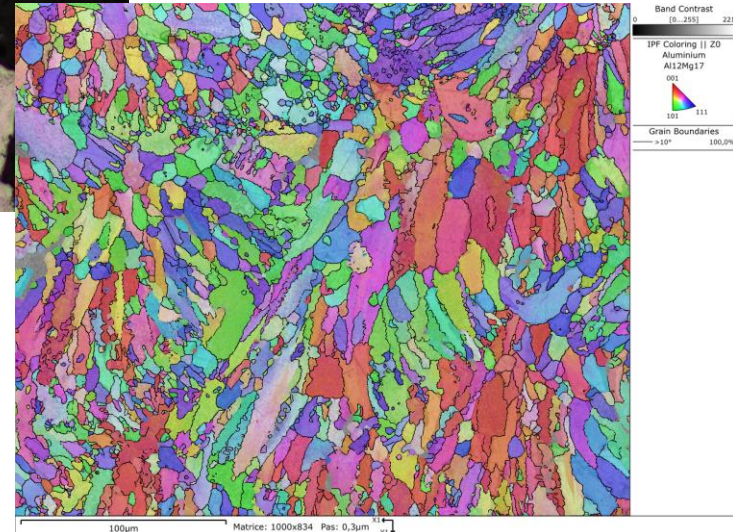
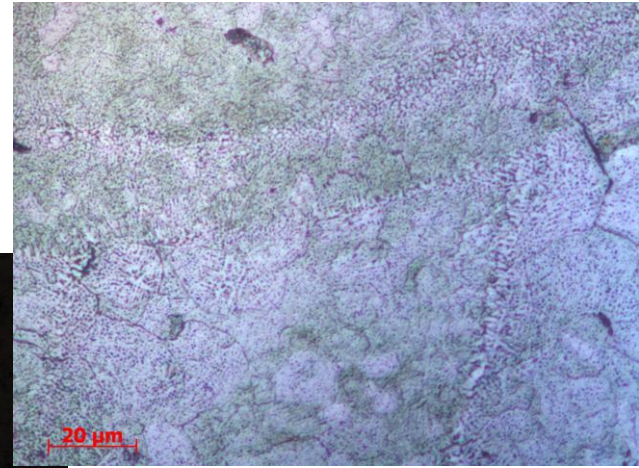
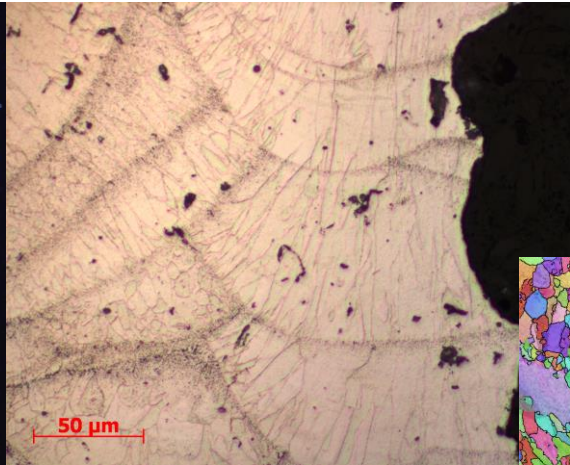
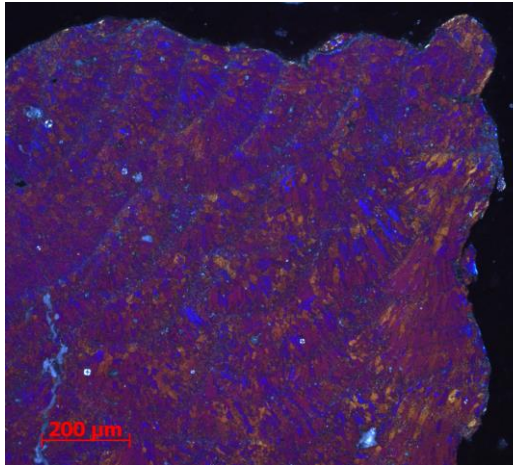
Peu ou pas d'évolution de la structure métallurgique après revenu seul.

A. Mauduit, H. Gransac, P. Auguste, and S. Pillot, Study of AlSi7Mg0.6 Alloy by Selective Laser Melting: Mechanical Properties, Microstructure, Heat Treatment, *jcm* **3**, 1 (2019).

Caractérisation

Structures métallurgiques

- ▶ AlMgty80 (Al-Mg) brut de fabrication



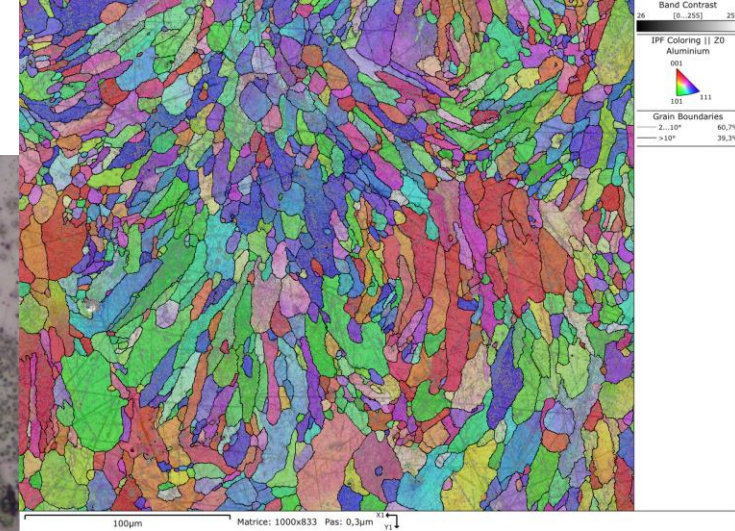
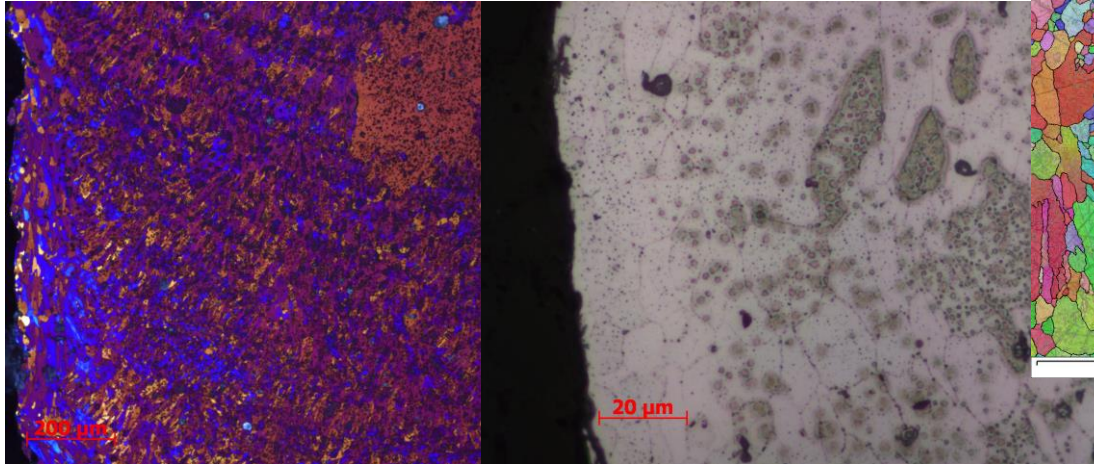
Mise en évidence :

- Des cordons de fabrication (à cœur et des contours)
- Des grains (orientés perpendiculaires au bordure des cordons)
- Dendrites de solution solide d'Al soulignées par l'eutectique (Al-Mg)

Caractérisation

Structures métallurgiques

▶ AlMgty80 (Al-Mg) après TTh (8h à 450°C)



Mise en évidence :

- Les cordons et dendrites sont effacés (homogénéisation)
- Des grains => certains semblent avoir recristallisés (gros grains)

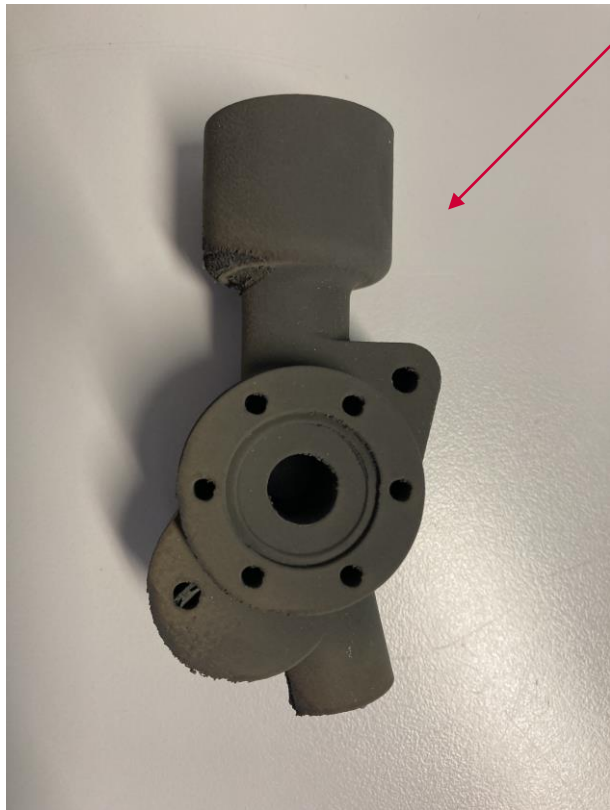
Préparation, polissage, traitement de surface

Objectifs et descriptions des traitements de surface

- ▶ Polissage => pour améliorer l'état de surface – réduire la rugosité (Ra, Rt, Rz)
- ▶ Oxydation anodique sulfurique (OAS) => couche amorphe d'oxyde d'aluminium (alumine) qui apporte comme propriétés :
 - Adhérence
 - Coloration « facile »
 - Résistance à la corrosion
 - Inertie chimique
 - Résistance à l'usure
 - Isolation thermique et électrique

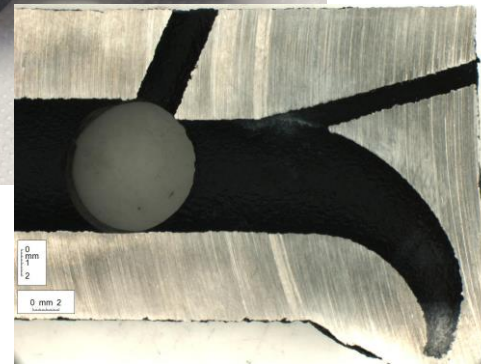
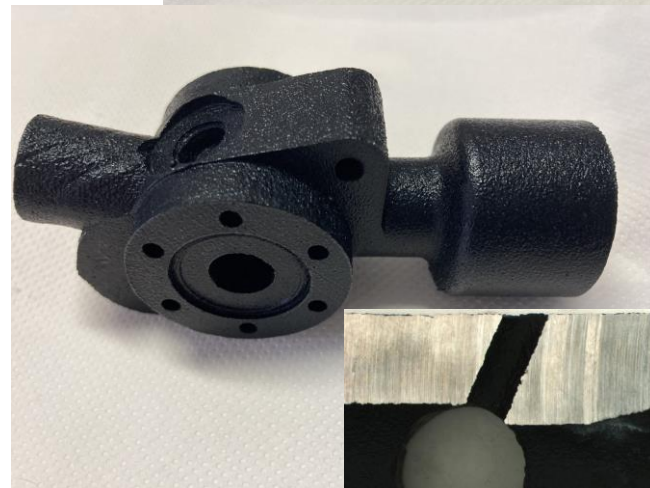
Résultats : observations visuelles

Illustrations



AlSi7Mg0,6
anodisé

Al-Mg
anodisé noir



Conclusions

Alliage AlSi7Mg0,6

- ⇒ Réalisation des pièces correctes (pas de problème matière, mécanique, ...)
- ⇒ Assez bon état de surface (sauf en donwskin) mais la rugosité reste supérieure à l'objectif ($Ra \leq 1,6 \mu\text{m}$)
- ⇒ Difficulté de polissage : peu d'amélioration de l'état de surface
- ⇒ Anodisation correcte (faible épaisseur) mais pas de coloration noire

Alliage AlMgty80

- ⇒ Réalisation des pièces correctes (taux de porosité plus élevé)
- ⇒ Etat de surface tourmenté (Ra élevé)
- ⇒ Polissage beaucoup plus facile : nette amélioration de l'état de surface
- ⇒ Anodisation correcte (bonne couche) avec belle coloration noire (mais difficulté d'anodisation de la forme borgne)

Perspectives

- ⇒ Amélioration envisageable de l'anodisation pour AlMgty80 jusqu'au fond de la forme borgne
- ⇒ Possibilité de remplacer le colorant noir (mixte organique/métallique) par une version sel métallique (à base d'étain)
- ⇒ Nouvel alliage (Constellium) Ahead CP1 : allie les avantages de l'AlSi7Mg0,6 (bon état de surface) et l'AlMgty80 (facilité de polissage, d'anodisation et bonne coloration)



Osez le futur