Document de support à la présentation :

**Fabrication additive de l’aluminium**

Contenu développé par :

Alexandre Bois-Brochu, Ph.D.

Laurie-Anne Méthot, étudiante en ingénierie

# Introduction

Ce document est un complément d’information à la présentation : « Fabrication additive de l’aluminium » d’Alu-Compétences. Des informations seront ainsi fournies pour chaque diapositive de la présentation.

Ce module de formation est fourni dans le cadre du projet Alu-Compétences d’AluQuébec, la grappe aluminium du Québec, et ses partenaires. Le projet Alu-Compétences vise à produire et à diffuser des contenus techniques et scientifiques pour l’enseignement de l’aluminium aux niveaux collégial et universitaire, notamment pour les programmes de design industriel, d’architecture et de métallurgie ainsi que pour les facultés de génie civil, mécanique et aérospatial. Alu-Compétences souhaite enrichir la formation des futurs professionnels sur les notions entourant l’aluminium. Il vise également à encourager les institutions d’enseignement à utiliser leur capacité d’adaptation des programmes de formation pour mieux répondre aux besoins des entreprises de l’industrie de l’aluminium en assurant un bassin de main-d’œuvre qualifiée.

Les partenaires du projet Alu-Compétences vous souhaitent bonne lecture.

# Diapositive 5

Les deux caractéristiques les plus importantes des alliages d’aluminium qui influencent le potentiel d’utilisation en FA sont la tendance au déchirement à chaud ainsi que la faible absorbance de l’aluminium pour les longueurs d’onde de laser utilisées en FA. La faible absorbance exerce une influence sur le lit de poudre et le DED tandis que le déchirement à chaud exerce également une influence sur le *WAAM* (Wire Arc Additive Manufacturing).

# Diapositive 6

Le déchirement à chaud est la tendance à la fissuration lors de la solidification ou lorsqu’on chauffe à haute température. Le déchirement à chaud se produit puisque l’intervalle de solidification est élevée, c’est-à-dire que la distance en température entre le solidus et le liquidus est très grande. Il y a alors formation de dendrites lors de la solidification. La dendrite est un cristal qui se développe en ramifications dans plusieurs directions. Elle apparaît pendant la solidification quand un métal contient des éléments en solution. Les éléments d’alliage sont ensuite rejetés dans les zones d’inter-dendritiques. À un certain moment, certaines zones contiennent une partie de liquide inter-dendritique qui est encore liquide alors qu’une grande partie de la solidification est effectuée. Il n’y a donc plus assez de liquide pour alimenter les zones inter-dendritiques. Il y a de la contraction thermique lors du déchirement à chaud. Ceci mène à une déchirure qui se produit après la contraction. Ce phénomène ne survient pas avec les métaux purs, incluant l’aluminium pur, parce que toute la solidification se fait à la même température. À l’eutectique, le liquide solidifie tout à la même température, alors cet effet n’est pas retrouvé non plus. Plusieurs familles d’alliages adoptent ce comportement outre que l’aluminium, mais il s’agit d’une caractéristique retrouvée dans beaucoup d’alliages d’aluminium, ce qui rend leur soudabilité relativement faible. Par exemple, l’aluminium-silicium est relativement peu susceptible au déchirement à chaud dans des concentrations élevées. C’est pour cette raison que les alliages de fonderie ont des concentrations de l’ordre de 7 à 12 % de silicium. Un exemple important est le AlMg2Si, qui représente la plage pour le 6061. Il est possible de constater un risque de déchirement à chaud qui est relativement important dans la plage contenant du Mg2Si. C’est la même chose pour l’aluminium-cuivre ; relativement toute la plage d’aluminium-cuivre est susceptible au déchirement à chaud. Il faut aller dans des concentrations plus élevées de cuivre pour éviter ce risque. C’est ce qui est représenté dans le graphique : l’alliage 2219 avec des concentrations de cuivre plus élevées possède une susceptibilité moins élevée que le 2024 au déchirement à chaud. La même chose est présente du côté magnésium-silicium. Le 4043 est constitué presque entièrement de silicium. Il n’est donc pas à risque pour le déchirement à chaud tandis que le 6061 a une sensibilité élevée à subir des fissurations lors du déchirement à chaud. Le déchirement à chaud peut être évité de certaines manière. Il y a actuellement des travaux de recherche qui sont effectués sur ce sujet. La vitesse de solidification exerce une influence. En utilisant un laser pulsé, une partie du déchirement à chaud peut être évitée. Cependant, la plupart des équipements de FA n’utilisent pas de laser pulsé. Il s’agit plutôt de lasers continus. Même si la solidification est rapide avec les procédés de fusion au laser sur lit de poudre, elle n’est pas assez rapide pour éviter la fissuration. C’est encore moins rapide pour le DED et le WAAM. Il y a également des méthodes alternatives. Par exemple, certains essaient de développer des alliages qui ne sont pas dans les plages du déchirement à chaud. L’autre avenue est la modification des alliages. Une solution qui fonctionne en fonderie et en soudage pour diminuer le déchirement à chaud est d’affiner la microstructure. Cette démarche permet que les grains et les dendrites soient beaucoup plus fins. Les grains correspondent aux éléments d’une phase métallique cristallisée, avec une orientation cristalline définie. Le liquide inter-dendritique a alors un accès plus facile à la solidification afin de pouvoir se propager et éviter les fissures.

# Diapositive 7

La densité d’énergie surfacique est une énergie divisée par la surface. Dans la densité d’énergie volumique, on ajoute l’épaisseur de la zone absorbée par le laser. Il s’agit du Ev au lieu du Es. Pour effectuer le calcul, il faut multiplier la fraction incidente d’énergie absorbée par le matériau à la puissance du laser (ou de la source d’énergie) puis diviser le tout par le diamètre de la zone effective en surface du matériau et par la vitesse de déplacement. Pour la densité volumique (Ev), l’épaisseur de la couche s’ajoute dans la division. Il existe deux façons de calculer la valeur D en fonction du procédé : le diamètre d’attache focale du laser ou la distance inter-passe. Ce sont deux informations complètement différentes. En DED, il y a un chevauchement entre les passes qui est assez important, soit de 30 à 50 %. Selon le diamètre d’attache focale du laser, le calcul ne donnera pas nécessairement toujours la même densité d’énergie. Les valeurs sont donc comparatives. Certains fournisseurs d’équipements ne mettent pas l’absorbance du laser dans l’équation parce qu’ils comparent juste entre les mêmes matériaux. C’est une très grande approximation de la réalité. En lit de poudre au laser, la distance entre deux passes est plus souvent utilisée. Cette distance est pourtant plus grande que le diamètre d’attache focale du laser. Encore une fois, le calcul de densité d’énergie ne représente pas la même chose que si taille focale du laser avait été utilisée. Dans le calcul, les deux équations sont valables. Cependant, elles ne sont pas équivalentes. Il faut donc les comparer respectivement : une équation pour un matériau et une autre équation pour un matériau différent. Comme on peut le constater dans le graphique, l’absorbance de l’aluminium est de 5 %, celle du cuivre de 1 % puis les valeurs pour l’acier, le titane et les alliages de nickel, sont de l’ordre de 35 à 40 %. En combinant ces valeurs avec la faible température de fusion, il y aura beaucoup de réflexions qui causent la fusion. La chaleur non incidente du laser fait fusionner les particules à la surface. Ce qui mène alors à une faible précision dimensionnelle de la pièce. C’est particulièrement le cas en DED. En lit de poudre, le diamètre d’attache focale du laser est suffisamment fin pour avoir une densité d’énergie suffisante pour fusionner le tout. En DED, la réflexion de 95 % peut devenir problématique puisqu’elle s’effectue vers la lentille. Normalement, un angle est placé sur la plaque de base pour que la réflexion s’éloigne de la lentille. Cette stratégie fonctionne seulement pour un certain moment. En continuant, l’accumulation se reflète sur la lentille et entraîne ensuite des brûlures du système optique qui dégradent le tout. En LPBF, puisqu’il s’agit d’un système de goniomètres avec des miroirs, le laser n’arrive pas de manière incidente. Les réflexions se font donc toujours en angle. Il n’y a pas d’auto-correction de la construction comme en DED. C’est beaucoup moins pire en lit de poudre au laser qu’en DED.

# Diapositive 9

La fabrication additive est un terme général qui englobe tous les procédés permettant d’ajouter successivement du matériel sous forme de couches afin de créer une pièce. Le terme impression 3D est utilisé principalement pour les polymères. Pour le métallique, ce terme tend à disparaître à cause de la nomenclature de normalisation. Le terme prototypage rapide semble lui aussi être effacé. Il était plus utilisé à l’époque où il y avait seulement des tests de prototypage. Actuellement, les méthodes de production sont employées. Les acronymes de certaines compagnies sont aussi utilisés pour la technologie. Ils seront présentés plus loin dans la présentation. En anglais, le terme « additive manufacturing » est employé. Sa contraction, AM, est très utilisée comme FA en français. Il y a aussi plusieurs familles de procédés de FA qui reposent sur les mêmes principes fondamentaux.

# Diapositive 10

L’idée de la fabrication additive s’oppose souvent à l’usinage, puisqu’elle ajoute de la matière au lieu d’en enlever. Il est possible de constater sur l’image du haut que l’usinage part d’un gros bloc qui est usiné, ce qui enlève beaucoup de matière et génère beaucoup de pertes. En fabrication additive, on essaie d’utiliser seulement la poudre qui est nécessaire pour bâtir la pièce. Il y a tout de même de l’usinage subséquent, mais normalement il y a beaucoup moins de pertes. C’est l’un des objectifs. La FA a un impact environnemental en termes de diminution du poids des pièces grâce à la faible consommation de matériel lors de la fabrication. Toutefois, lors de la production de poudre, une bonne proportion de la poudre est un rejet. Donc il y a quand même un peu plus de matériel qui est utilisé pour produire la poudre que ce qui est utilisé pour imprimer la pièce.

# Diapositive 11

La première étape de la FA est la conception assistée par ordinateur. Un dessin est réalisé sur ordinateur pour avoir un fichier STL ou STEP qui permet d’imprimer la pièce. Souvent, une optimisation topologique est effectuée. Il s’agit d’une optimisation de la forme de la pièce pour respecter les requis mécaniques tout en considérant les contraintes géométriques. Par exemple, lorsqu’une pièce est boulonnée aux deux bouts, mais les deux surfaces, aussi boulonnées, sont des zones de contraintes, il n’est pas facile de changer la forme parce qu’il faut que la surface boulonnée soit plate. À l’inverse, il est possible de réduire la matière de la section centrale jusqu’à ce que les propriétés mécaniques soient respectées, mais qu’il n’y ait pas de superflu de matière. Il y a différents logiciels utilisés à différents niveaux d’optimisation. Plusieurs logiciels créent des formes finales très biologiques, mais c’est de moins en moins adopté puisque cela complexifie l’inspection des pièces par END (essais non destructifs). Les formes biologiques en conception sont plus arrondies alors que les formes industrielles sont carrées. Il s’agit de couper toute la matière qui n’est pas nécessaire, donc les coins et les arêtes de la pièce sont souvent remplacés par des formes arrondies lors de l’optimisation. La tendance mène donc à utiliser des géométries plus industrielles, mais qui sont optimisées tout de même. Après l’optimisation, le fichier numérique est enregistré. Il est ensuite transféré vers l’équipement ou vers un logiciel qui permet de transformer le dessin en parcours de fabrication. Le tout est paramétrisé pour l’impression. Le dessin commence par être la forme de la pièce au complet, puis le logiciel le tranche en différentes couches en fonction des paramètres d’utilisation. Il produit également le parcours. Par exemple, si l’impression désirée est constituée de des passes qui se chevauchent de 1,25 mm, il va y avoir des lignes dans le parcours à chaque 1,25 mm pour chacune des couches. Les paramètres introduisent l’information, par exemple la puissance du laser, la vitesse de déplacement, etc. La pièce est ensuite récupérée. Souvent, dans les procédés de lit de poudre, cette étape implique d’enlever la poudre supplémentaire. Des post-traitements sont aussi effectués. En DED, il va y avoir de l’usinage subséquent. En lit de poudre au laser, il faut séparer les pièces de la plaque de base. Les supports doivent aussi être enlevés. On ne peut donc pas imprimer puis utiliser la pièce tout de suite. Un post-traitement est nécessaire pour arriver à l’utilisation finale de la pièce.

# Diapositive 12

Les neuf familles selon la norme ASTM 52900-15 sont : la FA par fusion sur lit de poudre, la FA par dépôt de matière sous énergie dirigée, la stratification de couches, la photopolymérisation, la projection de liant, la projection de matière et l’extrusion de matière. Pour le métallique, les points 1 (PBF), 2 (DED), 3 (UAM) et 5 (projection de liant) sont concernés. Dans le PBF, il y a à la fois la fusion sur lit de poudre avec un laser et par faisceau d’électrons. Le faisceau d’électrons est généralement plus cher puisqu’il était autrefois dirigé seulement par une entreprise. Maintenant, les brevets sont échus. Plusieurs entreprises produisent donc ce type d’équipement. La plus grande portion du marché demeure cependant la fusion au laser sur lit de poudre. Il y a des avantages et des inconvénients dans les deux procédés. La fusion par faisceau d’électrons permet généralement d’avoir des pièces qui sont plus massives qu’en fusion au laser sur lit de poudre avec moins de risques. Il y a toutefois des enjeux. Il n’est pas possible de faire des canaux de refroidissement internes parce que la poudre est filetée dans les canaux. De surcroît, plusieurs alliages ne peuvent pas être utilisés à cause de la vaporisation des éléments d’alliage. La fusion au laser sur lit de poudre est donc un procédé beaucoup plus commun. L’acronyme utilisé est principalement LPBF. Sinon, DMLS et SLM sont encore très communs. Pour le faisceau d’électrons, c’est EBM qui est adopté à cause de l’unique type de fournisseur. Il n’y a pas de compétiteurs qui proposent différents acronymes. En DED, les acronymes LMD et DMD sont moins utilisés. LMD est adopté un peu en Europe, mais c’est principalement DED qui est adopté. Les procédés du DED sont le dépôt sous énergie dirigée avec de la poudre (PF-DED), avec du fil (WF-DED), puis les procédés de soudage à arc comme le WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Dans le WAAM, on utilise un fil et un arc électrique pour produire la pièce. Le EBAM (Electron Beam Additive manufacturing) pourrait également être ajouté à la liste. Il s’agit d’un procédé dans lequel on utilise un fil et un faisceau d’électrons. C’est un peu comme l’EBM, mais avec un fil. Sinon, pour la stratification de couches, il y a différentes méthodes comme le LOM (Laminated Object Manufacturing). Il y a aussi l’UAM qui est utilisé pour le soudage par ultrasons. Ce sont des méthodes qui sont très distinctes les unes des autres pour la stratification de couches. Ensuite, en projection de liant, un liant est appliqué couche après couche sur un lit de poudre. Des post-traitements sont nécessaires par la suite. Ils seront détaillés plus loin dans la présentation. Finalement, l’extrusion de matière est utilisée pour les polymères, mais certains fournisseurs produisent des pièces avec de la poudre métallique mélangée avec des polymères qui peuvent fondre, des thermoplastiques, pour produire des pièces par extrusion de matière. Le résultat ressemble aux pièces de projection de liant. Les post-traitements sont les mêmes.

# Diapositive 13

Voici un exemple de l’ensemble des procédés qui peuvent être utilisés pour la fabrication.

# Diapositive 15

Plusieurs acronymes sont disponibles pour la fusion au laser sur lit de poudre. SLM est encore très commun. SLS tend plutôt à disparaître. C’est un acronyme distinctif du laser sintering, qui était employé à l’époque où les lasers n’étaient pas assez puissants pour fusionner complètement la poudre. Seulement un frittage était alors réalisé. EBM est lui aussi encore utilisé. En fusion au laser sur lit de poudre, une couche de poudre est appliquée dans le milieu (zone 2) et le laser passe pour fusionner le tout avec un système de goniomètres, donc des miroirs qui font refléter le laser aux différents endroits. Ensuite, le plateau est baissé d’un incrément de couche, la poudre est réappliquée, le distributeur de poudre et un racleur (ou un rouleau sur l’image) étendent la poudre, puis le cycle recommence. L’image constitue une ancienne méthodologie. Les vieilles machines fonctionnent en poussant la poudre vers le haut alors que maintenant des distributeurs de poudre sont en haut et remplissent le bassin de manière incrémentale. Le racleur est directement associé au distributeur de poudre, donc la poudre est appliquée en même temps que le racleur passe pour l’étendre.

# Diapositive 16

Voici un exemple de pièces qui peuvent être imprimées en fusion au laser sur lit de poudre. La pièce en haut à droite est très optimisée topologiquement. Le procédé permet de faire des pièces de formes complexes avec un fini de surface relativement bon. C’est relatif parce que ce n’est souvent pas suffisant pour des applications de fatigue. Cependant, il peut être amélioré avec des méthodes de polissage par pâte abrasive ou électrolytique. L’exemple à gauche est une pièce d’inconel 718 avec une épaisseur de couche de 30 microns imprimée sur une SLM 280, qui est le modèle standard. Elle fait 280 par 280 par 360 mm. Avec une épaisseur de couche de 30 microns, la pièce prend 3 jours, 5 h et 25 min à imprimer. Plus les machines sont grosses, plus c’est long d’imprimer une même pièce. Pour le deuxième exemple à gauche sur la SLM 280 Twin, encore avec une épaisseur de couche de 30 microns, la pièce prend 1 jour 19 h et 11 min à imprimer. Avoir deux lasers sur une imprimante permet pratiquement de diminuer le temps par deux. Diminuer les épaisseurs de couche aide également à réduire le temps.

# Diapositive 17

Parmi les équipements, EOS M290 est 250 par 250 par 325 mm. C’est une taille typique pour la plupart des fournisseurs, que ce soit Renishaw, Phenix, SLM Solution ou Concept Laser. Il y a aussi plusieurs autres compagnies de moins grande taille. La plupart des fournisseurs de produits utilisent ce format d’équipement, qui est le plus commun au Canada, principalement avec un seul laser parce qu’ils l’ont acheté lorsqu’il y avait encore uniquement des équipements à un laser. Maintenant, les fournisseurs de machines vendent des systèmes à plusieurs lasers. Les nouvelles machines achetées récemment vont donc avoir plusieurs lasers pour faire de la production plus rapide. À droite, la SLM 125 est un modèle plus petit qui est plus efficace pour des quantités de poudre moins grandes parce que le coût monte rapidement. Remplir une EOS M290 de titane représente environ 40 000 $ de titane pour remplir complètement le bassin. Il s’agit de la poudre nécessaire pour partir l’impression d’une pièce même si toute la poudre n’est pas consommée. Le bassin complet d’une SLM 125 représente plutôt 5000 $ de titane. Ce qui revient beaucoup moins cher pour des petites pièces parce qu’elles sont constituées de zones beaucoup plus petites. À l’inverse, il existe des systèmes comme le SLM NXG XII 600 qui est un gros modèle contenant 12 lasers de 1 KW. Il fait 600 par 600 par 600 mm. Il faut à peu près 150 000 $ de titane pour partir une impression. Les prix des équipements varient beaucoup : 300 000 $ ou moins pour les petites machines, autour de 1 000 000 $ pour les machines de taille normale, puis plusieurs millions de dollars pour les machines de grande taille.

# Diapositive 18

L’optimisation topologique est l’optimisation de la forme de la pièce pour diminuer significativement la matière en respectant les contraintes. Par exemple, à gauche, c’est une pièce réalisée par usinage qui n’est pas optimisée du tout. Elle est ensuite placée dans l’optimisation topologique en spécifiant le besoin d’enlever de la matière et qu’il y a des contraintes à respecter à certaines places. La pièce est optimisée de cette façon pour obtenir une forme qui est un peu plus organique et qui est beaucoup moins lourde que la pièce originale, ce qui donne donc une liberté de design et de personnalisation. On obtient alors des types de pièces qui sont impossibles à produire autrement et on observe des diminutions de quantité de matière significatives.

# Diapositive 19

L’un des principaux désavantages du LPBF réside dans les contraintes résiduelles qui sont souvent assez élevées. Elles peuvent être diminuées avec des plaques chauffantes, mais elles demeurent importantes. Même dans les zones de supports, il y a parfois des contraintes assez élevées qui causent soit de la délamination, des déchirures des supports ou, comme sur l’image, des fissures dans les pièces. Même dans des pièces comme l’acier inoxydable 316, qui a 60 % d’allongement, on peut avoir des fissures. La découpe des supports et l’usinage post-impression font croître le coût significativement. Ils représentent environ 50 % du coût total. Par exemple, la pièce en haut à droite doit se faire retirer ses supports et être usinée. Les coûts d’impression restent également élevés, donc c’est une méthode moins utilisée pour des pièces à faible valeur ajoutée. Il faut cependant vraiment des pièces à faible valeur ajoutée pour qu’elles ne soient pas rentables. Le LPBF est donc l’un des procédés les plus coûteux en FA, mais il permet des designs plus complexes.

# Diapositive 20

Généralement, si un procédé traditionnel est capable de produire la pièce, c’est probablement l’option la moins chère. C’est vrai dans la plupart des cas, mais plusieurs études récentes montrent qu’au lieu d’usiner des pièces en acier, il est possible d’obtenir un moindre coût en DED, en projection de liant ou même en lit de poudre au laser s’il s’agit d’une pièce qui est coulée par cire perdue. Le coût de la poudre peut être relativement élevé. Il faut 50 kg de titane, donc environ 15 000 $ pour un volume de 250 par 250 par 325 mm. Si le client désire faire une seule impression, il doit quand même payer toute la poudre dans la chambre. Le LPBF permet de faire des systèmes de refroidissement internes, tels que démontrés sur l’image. Il permet également de faire des structures en lattice. Les lattices sont des structures évidées qui se croisent comme des supports. Elles sont souvent placées à l’intérieur d’une pièce au lieu de la remplir de matériel afin d’effectuer une économie. Ces structures permettent de réduire le poids puis d’absorber l’énergie importante. C’est cependant de moins en moins utilisé puisque cela complexifie beaucoup l’inspection par END. Il est aussi possible d’orienter la pièce pour diminuer la quantité de supports afin de diminuer les coûts de post-impression.

# Diapositive 21

Plusieurs alliages ont été testés dans la littérature pour la disponibilité en LPBF. Cependant, les alliages commercialement disponibles comprennent seulement trois alliages, soit le AlSi7Mg et le AlSi10Mg, qui sont deux alliages de fonderie, et le Scalmalloy, qui est un alliage avec du scandium. Il est toutefois très peu accessible parce que les fournisseurs bloquent l’accès de cet alliage. Pour les autres alliages, il y a des travaux en cours actuellement qui sont faits avec la modification de la composition. Certains fournisseurs de poudre travaillent pour les rendre plus disponibles.

# Diapositive 22

Les propriétés pour du AlSi10Mg tel qu’imprimé sont 235 MPa de limite conventionnelle d’élasticité, 440 MPa de résistance mécanique et 4 % d’allongement. Lorsqu’il est traité thermiquement, la limite élastique augmente à peine, la résistance mécanique baisse et l’allongement augmente. Les traitements thermiques pour ces alliages ne sont pas aussi efficaces qu’ils le sont pour des pièces coulées, où les propriétés des pièces telles que coulées ne sont pas du tout les mêmes. Souvent, elles seront utilisées telles qu’imprimées et non traitées thermiquement puisque les propriétés mécaniques sont déjà élevées. Cependant, elles demeurent des propriétés mécaniques moyennes. Il y a justement des investigations pour pouvoir développer et utiliser des alliages à plus haute résistance pour la FA de l’aluminium.

# Diapositive 23

Le marché principal de FA pour l’aluminium est l’aéronautique. Les alliages existants sont favorisés à cause du processus de certification. Les procédés traditionnels pour les pièces d’aluminium dans ce domaine restent coûteux alors c’est assez rentable pour l’aluminium. Justement, ce sont souvent des pièces à très haute valeur ajoutée qui sont utilisées. L’enjeu de disponibilité d’alliage est toujours contraignant. De plus en plus, le marché s’ouvre dans le secteur automobile pour faire des blocs moteurs et différentes pièces en FA, ce qui devient très intéressant.

# Diapositive 24

Un faible nombre d’alliages est disponible pour contrer le déchirement à chaud. L’une des solutions disponibles est l’utilisation d’un système à laser pulsé, comme ce qui est fait à l’Université McGill avec le système Renishaw. Il fonctionne mieux pour les alliages à faible soudabilité. La modification mineure par affinage de grains peut également compenser partiellement au déchirement à chaud. Finalement, le développement des nouveaux alliages hors des zones à risque pour le déchirement à chaud est fait avec le système Tekna au CMQ.

# Diapositive 26

Il existe différents acronymes pour les procédés de DED. En Europe, le LMD est souvent utilisé. EBAM, le système LENS d’Optomec et le système AMBIT, qui est basé sur le Laser Cladding, sont aussi employés comme nomenclatures. Dans le DED, une source d’énergie avec une alimentation de fil ou de poudre est projetée dans le faisceau laser pour fusionner le tout afin de bâtir la pièce. Habituellement, il y a une protection gazeuse autour de la zone construite pour éviter qu’il y ait une oxydation de l’aluminium. Dans le cas de la LENS avec l’aluminium, il y a une atmosphère complète de gaz qui permet de protéger de l’oxydation. Parce qu’il y a un laser incident, une réflexion importante peut se créer et ainsi endommager le système optique dans les systèmes avec laser. C’est beaucoup moins pire dans les systèmes avec fil, mais les systèmes filaires comme le WAAM sont beaucoup plus efficaces pour la FA de l’aluminium.

# Diapositive 27

En DED, il est possible de faire des procédés qui permettent de réparer des pièces, faire des pièces avec des gradients de composition puis faire des recouvrements métalliques. Souvent, la plaque de base est utilisée dans le développement. Un exemple est démontré sur l’image en bas à gauche. La plaque de base est à l’intérieur, puis la déposition a été faite par-dessus. Au lieu d’usiner 90 % de la matière pour faire cette pièce, seulement 10 % de la matière est usiné pour faire la pièce par DED. Les autres images présentent des exemples de gradients de composition. Ce sont des pièces faites par DED qui sont très efficaces ; elles ont différentes géométries qui sont intéressantes. On peut également avoir des hauts taux de déposition pour faire des grosses pièces.

# Diapositive 28

Voici d’autres exemples de réparation de pièces. Dans cet exemple, une pièce de fonderie de titane avait subi des défauts de fonderie mais ils ont été réparés directement. L’autre exemple montre des ajouts de matière sur des pièces existantes puis des dépôts en mode recouvrement (cladding) qui sont effectués sur les pièces.

# Diapositive 29

Parmi les types de technologies disponibles, il y a le système d’Optomec. Il s’agit d’une LENS 450XL à 1 KW avec un taux de déposition relativement faible de 7 cm cubes à l’heure. La chambre est sous atmosphère, donc elle permet de travailler sur le titane et sur l’aluminium. Ce système en particulier possède une petite chambre, mais Optomec fait de plus gros systèmes. Il y a différents systèmes sous atmosphère qui peuvent travailler sur les matériaux réactifs. Il s’agit des DED dédiés avec poudre.

# Diapositive 30

Il existe aussi des systèmes hybrides comme celui-ci qui sont intégrés dans une machine à outils. Le taux de déposition est plus élevé dans cet exemple à cause du laser pulsant et de la taille focale du laser qui est plus grosse. Généralement, il n’est pas possible de travailler sur l’aluminium avec ce système, car il n’est pas sous atmosphère. Techniquement, certaines entreprises peuvent modifier le système pour le mettre sous atmosphère, mais c’est plutôt rare.

# Diapositive 31

Un exemple du procédé WAAM est le CMT de Fronius, qui est un procédé de soudage dans lequel le dépôt est plus froid parce que l’arc électrique est retiré par incréments très rapides. Il permet d’avoir un transfert de chaleur beaucoup moins important dans la pièce et donc d’obtenir un régime permanent qui permet de bâtir la pièce. Le taux de déposition est très élevé, ce qui permet de faire des pièces qui sont assez massives.

# Diapositive 32

Le contrôle dimensionnel en DED avec fil est beaucoup moins élevé que celui en DED avec poudre. Pour l’aluminium, cela fonctionne très bien parce que ce sont des alliages en fil de soudage qui sont utilisés. Le procédé EBAM de Sciaky possède des taux de déposition très élevés, mais il n’est généralement pas utilisé pour l’aluminium à cause de sa température de vaporisation plus faible sous vide. Il tend donc à s’évaporer dans le procédé.

# Diapositive 33

Les avantages du DED sont : un taux de déposition très élevé pour les pièces de grande taille, il permet la réparation de pièces, l’utilisation de plusieurs matériaux (gradient ou recouvrement), la fabrication hybride de pièces (procédé traditionnel et DED) et il présente moins de contraintes résiduelles que le PBF. Les désavantages du DED sont : les géométries généralement moins complexes que d’autres procédés de FA, un fini de surface de mauvaise qualité qui requiert pratiquement toujours de l’usinage puis la précision dimensionnelle, le fini de surface et la faible déformation sont inversement proportionnels à la productivité. Il est alors important d’effectuer le choix du procédé en fonction de la pièce. Par exemple, le WAAM a une productivité beaucoup plus élevée que le procédé LENS, mais le procédé LENS a une précision dimensionnelle beaucoup plus élevée. C’est un choix de procédé en fonction de la pièce et de l’optimisation de la pièce.

# Diapositive 34

L’une des caractéristiques de l’aluminium par DED est la très faible énergie absorbée par l’aluminium. Environ 90 % de l’énergie incidente est réfléchie. Ce qui requiert donc une puissance très élevée lors du procédé pour obtenir une fusion adéquate. C’est très risqué pour le système optique et pour la fibre du laser. Ce phénomène peut entraîner des bris importants de l’équipement. L’aluminium en DED présente un mauvais fini de surface et une précision dimensionnelle plus faible que pour d’autres alliages (Fe, Ni), à cause des projections à la surface des pièces. Puisque qu’il y a beaucoup de réflexions de laser, l’énergie est réfléchie et entraîne des projections en surface. Les alliages disponibles sur le marché sont de faibles à moyennes résistance. Les caractéristiques principales de l’aluminium par WAAM sont : un taux de déposition beaucoup plus élevé que le DED, un mauvais fini de surface et une précision dimensionnelle faible associée au procédé, les pièces finales doivent être usinées et les alliages sont de faible à moyenne résistance sur le marché (4043, AlSi7Mg, 6061\*). Le 6061 a une faible soudabilité. Il est à risque de déchirement. Il y a donc peu d’alliages qui sont disponibles sur le marché.

# Diapositive 35

Voici un exemple sur l’image du haut de réparations de pièces coulées faites par DED. Elles démontrent la capacité du DED à réparer des pièces. Sur l’image du bas, ce sont des dépôts faits par WAAM.

# Diapositive 36

Tel que mentionné précédemment, les alliages d’aluminium disponibles en poudre pour le DED sont le AlSi7Mg, le AlSi10Mg et le Scalmalloy. Il y a un peu plus d’alliages d’aluminium disponibles en fil. Il s’agit de tous les alliages qui peuvent être utilisés pour le soudage. Le F357 est comme du AlSi7Mg. Sinon, il y a le 4043 et le 6061.

# Diapositive 37

Pour le LENS, avec 1 kW on atteint un dépôt de 21 g/h. Par CMT, c’est 420 à 1080 g/h et par AMBIT c’est 105 à 150 g/h. On voit donc l’ordre de grandeur des dépositions qui peuvent être effectuées avec l’aluminium.

# Diapositive 38

L’aluminium tend à absorber l’humidité. En poudre ou en fil, il peut y avoir de l’hydrogène absorbé à la surface qui entre dans la pièce. Lorsqu’il est dans la pièce, il se transforme en porosités gazeuses d’hydrogène comme on peut le voir sur l’image de gauche qui a beaucoup de porosités. C’est dû au fil qui est absorbé. Puisque l’hydrogène est petit et plus diffusé, il peut y avoir diffusion d’hydrogène lors de la HIP (Hot Isostatic Pressing). La HIP est une sorte de traitement thermique qui utilise une forte pression pour améliorer les propriétés mécaniques. Il est alors possible d’enlever ces défauts-là, tel qu’illustré sur l’image de droite. Il faut donc faire attention à l’humidité sur les poudres et sur le fil qui va être absorbé et qui peut causer des porosités gazeuses de manière beaucoup plus importante que dans d’autres alliages. Le titane et l’acier sont beaucoup moins susceptibles à la formation de porosités par l’hydrogène que l’aluminium. Le même phénomène se déroule en fonderie.

# Diapositive 40

Le soudage par ultrasons est un procédé de fabrication par soudage à l’état solide à partir d’ultrasons. Sur l’image de gauche, on voit la tête de déposition, le feuillard et le substrat. Il y a une amplitude d’oscillation. La tête vibre horizontalement et soude par mélange mécanique le feuillard au substrat. L’équipement est présenté sur l’image de droite dans une machine à outils. C’est un système qui dépose uniquement en 2D. Un usinage subséquent est nécessaire pour obtenir la forme 3D.

# Diapositive 41

Le soudage par ultrasons permet de faire des zones évidées dans les pièces. À gauche, la tuyauterie est évidée. La fabrication est surtout concentrée sur des pièces très amincies pour l’aéronautique. L’UAM permet de souder des matériaux dissimilaires. On voit l’exemple de l’aluminium qui est soudé avec du cuivre ou avec du titane sur les images. Il y a aussi des renforts qui sont introduits pour faire des composites de haute résistance. Cependant, il y a une limitation par rapport à la résistance. On peut difficilement souder les matériaux avec eux-mêmes parce qu’ils vont subir aussi facilement à la tête de déposition que sur le substrat. Cependant, pour l’aluminium, le procédé s’applique très bien. La plupart des alliages d’aluminium peuvent être utilisés et déposés directement à partir du procédé.

# Diapositive 42

Les designs de pièces sont en grande partie plats uniquement à cause de la forme des sonotrodes. Pour une géométrie complexe, il faut effectuer un usinage significatif. Bien qu’il soit possible d’imprimer des pièces de hauteur significative, la hauteur est habituellement limitée à 25 mm d’épais à cause de la perte sonore dans la pièce. La diffusion sonore dans la pièce fait en sorte qu’on perd de l’énergie sonore. Certains matériaux sont plus difficiles à souder en raison de leur tendance à se souder aussi facilement sur la tête de soudage que sur le substrat, mais ce n’est pas un problème qui concerne l’aluminium.

# Diapositive 43

Pour l’UAM, tous les alliages qui sont disponibles sur le marché en feuillards minces peuvent être utilisés. Les séries 5000 ont une soudabilité plus faible à cause de l’oxyde en surface qui tend à éviter la formation de joints efficace. On en voit l’influence sur l’image où il y a des porosités dans la pièce à cause de l’oxyde de magnésium à la surface.

# Diapositive 44

En fonction de l’alliage et les conditions de traitement thermique de la plaque de base, les propriétés mécaniques des pièces varient. La hauteur de dépôt est réalisable en fonction de l’alliage. Le 5056 est très limité à cause de sa forte résistance. Pour la série 5000, c’est en fonction du pourcentage de magnésium qui est à la surface et qui limite la soudabilité. Sinon, pour les alliages de séries 1000, 2000, 3000, 6000 et 7000, il n’y a pas de problème.

# Diapositive 46

Le système de projection de liant est un système de lit de poudre, mais au lieu d’avoir une tête qui fusionne le tout, une tête d’imprimante à jet d’encre projette un liant qui va coller la pièce couche après couche pour bâtir le tout. Le design montré sur l’image est le système plus ancien où la poudre se fait pousser par en haut. Maintenant, nous retrouvons plus de distributeurs qui sont sur le dessus et qui font des passes, ce qui permet de produire des pièces en sable et de faire des pièces métalliques. Pour l’aluminium, c’est peu utilisé directement à cause de la réactivité des poudres. Ces machines ne sont pas souvent sous atmosphère. ExOne travaille toutefois avec Ford pour produire des équipements qui permettent d’imprimer l’aluminium directement par projection. Une fois la pièce imprimée, elle doit être déliantée. Le liant est brûlé et la pièce est frittée. Des traitements thermiques à haute température sont effectués pour créer des ponts entre les poudres. La pièce est ensuite potentiellement infiltrée ou traitée par pressage à chaud. Par exemple, l’acier est souvent infiltré au cuivre pour obtenir une densité complète. Pour l’aluminium, c’est plus difficile parce que les alliages compatibles sont faibles. La pièce peut cependant être pressée à chaud pour obtenir une pleine densité.

# Diapositive 47

La projection de liant permet de produire des pièces en sable pour la production de noyaux.

# Diapositive 48

Voici les différentes machines qui sont disponibles pour le système d’ExOne. ExOne et Desktop Metal sont maintenant le même fournisseur, donc certaines de ces machines n’existeront plus, car elles seront fusionnées dans la même ligne de produits. Desktop Metal a acheté ExOne. Il y a différents formats qui servent autant à imprimer des pièces métalliques que des grosses pièces en sable ou des plus petites pièces métalliques.

# Diapositive 49

Les grosses machines comme la S-Print servent principalement à imprimer les moules en sable pour des pièces de très grande taille.

# Diapositive 50

On peut voir sur les images des moules en sable. Ce sont des exemples de plusieurs étapes de moules pour produire des pièces en industrie. De très gros moules sont produits en industrie avec des noyaux très complexes. Ils sont donc difficiles à faire autrement que par projection de liant. Le procédé permet de faire des pièces de courtes séries de manière très intéressante. Des courtes séries équivalent à un développement de produits beaucoup plus rapide.

# Diapositive 52

Le contrôle non destructif de l’aluminium en FA se fait principalement par radiographies. Avec les radiographies, la détection minimale est de l’ordre de 2 % d’épaisseur. On est souvent limité à 120-150 microns à cause du canon et du film, tandis que les défauts sont de l’ordre de 5 à 350 microns en FA. Il y a une méthode alternative qui est la radiographie avec un canon focus. Elle utilise les mêmes films, mais en systèmes 2D, alors la résolution atteinte est d’à peu près 20 microns. Les ultrasons peuvent être utilisés avec une détection minimale de 1,26 mm à 5 MHz et 0,63 mm à 10 MHz. Il y a des méthodes pour augmenter cette résolution pour aller jusqu’à 125 microns. Le liquide pénétrant peut aussi être employé pour les fissures en surface. La tomodensitométrie peut être utilisée pour voir les défauts de très petite taille. C’est intéressant pour du développement de produit, mais il s’agit d’une méthodologie très coûteuse. Alors le développement est souvent fait par microstructure, puis d’autres méthodes sont adoptées par la suite. Il y a beaucoup de développement avec les méthodes de radiographie 2D.