



**HAL**  
open science

## Définition d'entités dans le cadre de la Fabrication Additive DED : état de l'art et proposition

Léo Pizzol, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier, Nicolas Béraud

### ► To cite this version:

Léo Pizzol, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier, Nicolas Béraud. Définition d'entités dans le cadre de la Fabrication Additive DED : état de l'art et proposition. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784358

**HAL Id: hal-04784358**

**<https://hal.science/hal-04784358v1>**

Submitted on 15 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Définition d'entités pour la Fabrication Additive DED : état de l'art et proposition

Léo PIZZOL<sup>(a)</sup>, Sylvain LAVERNHE<sup>(a)</sup>, Christophe TOURNIER<sup>(a)</sup>,  
Nicolas BERAUD<sup>(b)</sup>

*(a) Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190, Gif-sur-Yvette, France*

*(b) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP\*, G-SCOP, 38000 Grenoble, France*

*\*Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes*

*Mail : [leo.pizzol@ens-paris-saclay.fr](mailto:leo.pizzol@ens-paris-saclay.fr)*

**Résumé :** Le développement de la Fabrication Additive (FA), et plus particulièrement des procédés DED (Directed Energy Deposition), permet de produire des pièces de plus en plus complexes, nécessitant le développement de gamme de fabrication. Dans le cas de l'usinage, la génération de gamme est une procédure maîtrisée depuis les années 1990 qui s'appuie directement sur une notion d'entité bien définie. Or, dans le cas de la FA, il n'y a pas de définition d'entité qui soit intégrée à la norme ou communément utilisée par la communauté. Cela est d'autant plus problématique que la notion d'entité intervient à de nombreuses étapes de la création d'une pièce, de sa conception à son contrôle. L'objectif de cet article est d'établir un état de l'art de la définition d'entité en DED et d'en proposer des éléments de définition. Pour cela nous étudions les définitions proposées dans la littérature, qui s'appuient sur des critères liés à la géométrie, aux procédés utilisés ou au lien entre la FA et l'usinage. La terminologie exploitée par les logiciels de FAO adaptés au DED est également prise en compte, ainsi que les expérimentations que nous avons menées en rapport avec le comportement thermique des échantillons produits. Cette synthèse nous conduit à proposer des concepts et paramètres clés à intégrer à la définition d'entité en DED, notamment des attributs thermiques en lien avec les transferts de chaleur.

**Mots clés :** Entité, Gamme, DED, Thermique

## 1 Introduction

De par leur capacité à produire des pièces complexes en petites séries, les différentes technologies de Fabrication Additive (FA) ont suscité un intérêt croissant pour les secteurs industriel et académique. Du point de vue normatif, de nombreux aspects ont été intégrés à la norme, notamment dans l'ISO/ASTM 52900 (ISO, 2021) qui définit le vocabulaire associé à la FA. Cependant, la notion d'entité est absente de cette norme et est également très peu étudiée dans la littérature. En comparaison, les normes associées à la définition d'entités en usinage ont bénéficié de la longue expérience dans le domaine et ont été formellement introduites dans les années 1990. Aussi, cet article porte sur la définition d'entités en FA et plus particulièrement dans le cadre des procédés DED (Directed Energy Deposition) multi-axes. Cette notion d'entité est en effet fondamentale puisqu'elle intervient à de nombreuses étapes de la réalisation d'une pièce : conception adaptée à la FA (Douin, 2022), génération de gamme (Ding, 2017), analyse des pièces produites (Poudel, 2022), etc. Définir les entités doit ainsi permettre de mieux appréhender le découpage géométrique des pièces pour s'assurer que les sous-volumes obtenus puissent être produits et ce dans les meilleures conditions. Après avoir passé en revue les différentes définitions issues de la littérature, nous listons les éléments à prendre en compte afin de proposer une définition complète de ce qu'est une entité en FA, et plus particulièrement en DED.

## 2 État de l'art

Dans cette partie, nous commençons par évoquer la définition des entités en usinage, qui sera ensuite utilisée comme base pour proposer une définition d'entité en FA. Puis, toujours en regard de l'usinage, nous nous intéresserons aux définitions d'entités proposées par les logiciels de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) dédiés à la FA, ici NX (Siemens) et ESPRIT (Hexagon). Viendront ensuite des propositions moins formelles issues de nombreux travaux proposant spécifiquement des méthodes de découpage de pièces en sous-volumes. Les méthodes purement géométriques qui définissent des sous-volumes à partir de critères topologiques sont d'abord étudiées, puis nous considérerons les méthodes basées sur des critères globaux de fabricabilité, particulièrement utilisés dans le cadre des procédés DED multi-axes.

### 2.1 Définition des entités d'usinage

Dans les années 1990, les travaux du groupe GAMA (Bourdet, 1990) ont défini une entité comme la combinaison d'une géométrie avec des spécifications, pour lesquelles un procédé de fabrication existe. Toujours dans les années 1990, la norme STEP (STandard for the Exchange of Product model data), ou ISO 10303, a été développée avec pour objectif de fluidifier le trafic de données au sein de la chaîne numérique. Elle décrit notamment les entités de fabrication en usinage (ISO, 2006). Ce protocole identifie les caractéristiques géométriques des pièces produites pour en déduire des entités de fabrication en lien très étroit avec les opérations d'usinage. Les entités de fabrication ainsi définies sont directement basées sur les entités d'usinage (rainures, poches, etc.), complétées par des entités de transition (chanfrein, congé, etc.) et possiblement répétées par des motifs (circulaire, rectangulaire, etc.).

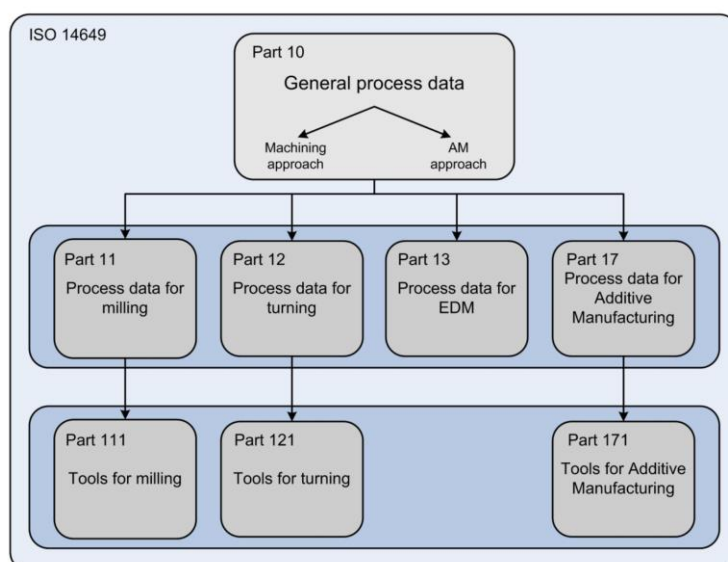


Figure 1: Architecture de la norme ISO 14649 modifiée  
FA proposée par R. Bonnard (Bonnard, 2010)

Le standard STEP-NC est venu compléter ces définitions d'entités (ISO, 2004) avec, dans un premier temps, des « *manufacturing features* » correspondant au plus haut niveau de la définition. Ici, seule la géométrie de l'entité est considérée. Le concept de « *manufacturing features* » est donc indépendant de la méthode choisie pour produire la pièce, ces informations étant contenues dans les attributs de la définition, comme le concept d'« *operation* », détaillé dans les parties 11 (usinage), 12 (tournage) et 13 (électroérosion) de la norme. Cette première définition est ensuite divisée en trois nouveaux concepts : « *region*, *transition feature* et *two5D manufacturing feature* ». Le premier correspond à la notion d'entité appliquée à l'usinage en forme libre. Le second, « *transition feature* », définit des entités de transitions équivalentes à celle de la norme STEP. Enfin, les « *two5D manufacturing features* » correspondent aux entités classiques en usinage en intégrant directement des éléments technologiques liés à la production des pièces. Ainsi, sa principale sous-catégorie, « *machining feature* », décrit les entités réalisables en usinage 2,5 axes : « *planar face, pocket, slot, step, hole, etc* ».

## 2.2 Définition d'entité FA basée sur les normes d'usinage

Comme présenté précédemment, la notion d'entité en usinage est parfaitement définie dans la norme ISO, via STEP ou STEP-NC. Elle peut ainsi être utilisée comme base pour obtenir une nouvelle définition d'entité et une chaîne numérique adaptées à la FA (Bonnard, 2010). Les entités « *manufacturing features* » (ISO, 2004) étant purement géométriques et indépendantes du procédé, leur définition reste théoriquement valide dans le cas de la FA. La principale limite de cette définition pour la FA est la notion de « *workpiece* », le brut d'usinage, qui n'est plus obligatoire dans le cadre de la FA. Ce brut est de plus défini comme étant nécessairement mono matériau là où la FA permet la production de pièce multi matériaux (Feenstra, 2021; Mussatto, 2022). En modifiant ces deux aspects, la partie 10 de la norme 14649 devient compatible avec les procédés de FA. Pour intégrer à la norme les spécificités de la FA, l'auteur définit une nouvelle partie (ici la *part 17*), placée au même niveau que les définitions liées aux procédés soustractifs

(figure 1). Dans cette partie, la notion de « *AM Workpiece* » donne une description générale de la pièce, à laquelle est associé des « *sub am workpieces* », qui définissent les entités de FA à proprement parler. Elles sont définies avec le même raisonnement que les entités d'usinage, à savoir une seule opération par entité. Dans le cadre de la FA, cette notion d'opération correspond à une production avec la même source d'énergie, les mêmes réglages de la machine et la même stratégie de fabrication.

(Bonnard, 2010) propose ainsi une définition très complète de ce que pourrait être une entité en FA, tout en proposant directement une stratégie pour l'intégrer dans la norme ISO 14649. La principale limite à cette définition est que l'ensemble des procédés de FA (DED, LPBF, etc.) sont définis dans la même partie, sans prendre en compte leurs spécificités comme cela est fait pour les différents procédés soustractifs. Une autre limite de cette définition vient de sa grande proximité avec l'usinage : le lien entre entité et opération de fabrication est moins évident dans le cadre de la FA. En effet, en utilisant la même source d'énergie, les mêmes réglages machines et la même stratégie, il est possible de produire des pièces complexes, que l'on pourrait intuitivement découper en plusieurs entités. À l'inverse, la notion de brut d'usinage pourrait être transposée en FA en décrivant le substrat initial, c'est-à-dire l'élément qui est placé dans la machine avant la production et qui sert de support à la production de la pièce par FA.

### 2.3 Définition d'entité FA inspirée des logiciels de FAO

Le développement des procédés de FA et leur utilisation par l'industrie ont poussé au développement de logiciels de FAO adaptés à ces procédés. Or, en l'absence de définition normée de ce qu'est une entité en FA, ces logiciels ont indirectement proposé leurs propres définitions d'entités, ce qui justifie leur place dans cet état de l'art. Nous nous focalisons sur les logiciels disposant d'un module dédié au DED multiaxes et plus particulièrement sur NX, développé par Siemens, et ESPRIT, développé par Hexagon, deux logiciels, issus du monde de l'usinage. Si aucun des deux ne propose de véritable définition d'une entité, ils offrent en revanche à l'utilisateur une liste d'opérations réalisables en lien avec le substrat, les mouvements de la machine et les géométries à produire. Ce sont ces opérations que nous allons détailler.

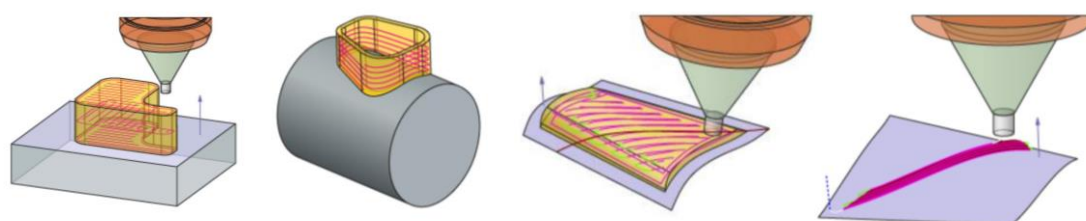


Figure 2 : Exemples d'opérations de FA proposées par le logiciel NX

Dans les deux logiciels, les opérations sont réparties en deux catégories, celles qui concernent les pièces fines, dites à parois minces, et celles qui concernent les pièces pleines. Par définition, les pièces à parois minces sont constituées d'un unique cordon répété le long de la direction de fabrication, qu'elle soit rectiligne ou non. La largeur des pièces obtenues est donc uniquement définie par la largeur du cordon et donc par les paramètres du procédé. Les logiciels de FAO ne considèrent pas de rapport entre largeur

et longueur pour les pièces minces, car ils ne se basent que sur la trajectoire de production et pas sur la largeur réelle du cordon. Cette distinction pièces fines - pièces pleines est pertinente du point de vue de la FAO, les pièces à parois minces étant les seules à ne pas nécessiter de stratégie de remplissage : la trajectoire est imposée par la géométrie. Concernant les pièces pleines, NX les distingue en fonction de la stratégie de remplissage alors qu'ESPRIT considère cette stratégie comme un choix à l'intérieur de la catégorie pièce pleine. On trouve également deux cas particuliers : une opération de « *glacage* », qui consiste à déposer une seule couche sur un substrat gauche et une opération « *tube* ».

En plus de ce classement des opérations en fonction des trajectoires correspondantes, ces logiciels définissent également des catégories en fonction du substrat sur lequel la géométrie sera produite : substrat plan, cylindrique ou de forme gauche. Cette distinction s'explique moins par des problématiques de trajectographie que par la nécessité de passer du 3 axes (substrat plan) au 5 axes continus (substrat cylindrique et gauche). En effet, en imposant la forme de la première couche, un substrat gauche nécessite généralement de réorienter la pièce au cours de la production, que ce soit pour en assurer l'accessibilité ou garantir que l'orientation du dépôt respecte les limites du procédé.

Pour la définition d'entités en FA, la classification utilisée par les logiciels de FAO présente plusieurs intérêts. Tout d'abord, elle présente intrinsèquement un très fort lien entre les opérations et les géométries produites au moyen de pseudo-entités directement adaptées aux procédés de fabrication choisis, ici le DED multiaxes. De plus, la notion de substrat est importante en FA, tout comme celle de brut en usinage, et il peut être intéressant de l'intégrer dans une définition d'entité en FA. Cependant, la liste d'opération-entité proposée par ces logiciels n'est pas une définition générale d'entité mais une approche opérationnelle proche de la production. Enfin, définir les entités par les opérations revient à déplacer le problème sur la définition d'opération en FA.

#### 2.4 Définition d'entité FA basée sur des critères géométriques

Les géométries complexes réalisables en FA font l'objet de nombreuses recherches visant à développer des stratégies de production performantes, en travaillant notamment sur les directions de production et le tranchage. Ces stratégies amènent les auteurs à découper leur pièce en sous-volumes assimilables à des entités géométriques, adaptées à la FA. On peut en trouver de deux types : les sous-volumes discrets et les sous-volumes continus.

Concernant les sous-volumes discrets, il s'agit de découpages pour lesquels la géométrie à produire est divisée en un nombre fini de sous-volumes, ayant chacun une unique direction de fabrication. Technologiquement, cette stratégie est mise en œuvre par des procédés DED en 5 axes positionnés. Une telle méthode est proposée par (Ding, 2016) pour permettre la réalisation de pièces complexes en DED, sans support. La méthode se base sur l'analyse de la courbure de la pièce pour générer une série de sous-volumes convexes, auxquels est associée une direction de fabrication. La première direction de fabrication étant définie par l'utilisateur, l'algorithme peut alors générer une arborescence permettant d'ordonner l'ensemble des sous-volumes en partant du premier qui sera produit et qui servira de substrat aux suivants (figure 3).

Pour générer des courbes de croissance et ainsi définir des sous-volumes continus, une des méthodes utilisées est la squelettisation de la pièce. Il s'agit d'un procédé

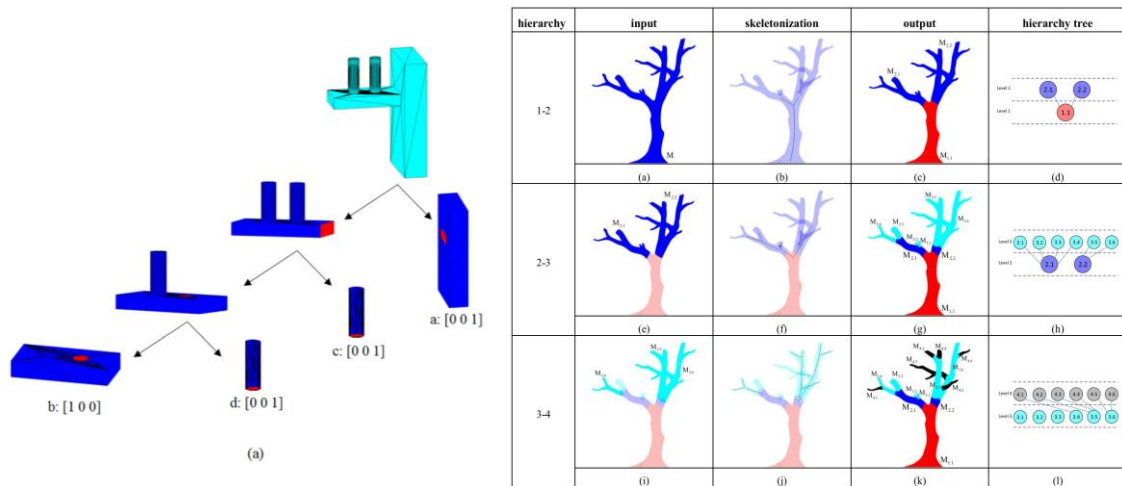


Figure 3 : Décomposition discrète (Ding, 2016) et continue (Wang, 2020) en DED

topologique permettant de réduire une géométrie complexe à un graphe, le squelette, représentatif de la géométrie initiale. Cette technique a été exploitée, entre autres, pour définir des courbes de croissance sur des géométries destinées à être produites en FA multiaxes (Wang, 2020 ; Xie, 2022). Cette méthode, couplée à des algorithmes de tranchage, permet de générer des sous-volumes sur n'importe quelle géométrie, tout en y associant des directions de fabrication locales (figure 3). Cela est particulièrement adapté dans le cadre des procédés DED en 5 axes continus.

Vis-à-vis de la définition d'entités, ces deux approches présentent l'avantage d'être systématiques et donc facilement automatisables pour traiter n'importe quel type de pièce. Ces définitions permettent également de prendre en compte les spécificités de la FA multiaxes, que ce en continu ou en positionné. Cependant, le principal défaut des méthodes géométriques est de ne pas considérer les limites du procédé, et notamment les difficultés à produire des pièces avec d'importants porte-à-faux. De ce fait, rien ne garantit que les sous-volumes ainsi générés soient fabricables, ce qui est rédhibitoire pour une définition d'entité.

### 2.5 Définition d'entité FA basée sur un critère procédé

Cette définition se base sur une méthode de découpage de pièce directement adaptée à la FA multiaxes. Elle s'appuie sur la décomposition d'une pièce en sous-volumes fabricables et non-fabricables en fonction d'une direction de fabrication donnée. Cette décomposition se base sur la volonté de produire des pièces sans support et sur l'incapacité des procédés DED à produire en dévers au-delà d'un certain angle. L'objectif est donc de trouver quels sous-volumes d'une géométrie nécessitent une réorientation de la pièce pour être produits (Singh, 2001; Ding, 2017; Authelin, 2022). Le principe général de cette méthode est de partir d'une première direction de fabrication pour identifier les sous-volumes en dévers, non fabricables. À chacun d'eux est alors associée une nouvelle direction de fabrication de manière itérative jusqu'à ce que tous les sous-volumes de la pièce soient considérés comme fabricables. L'angle maximal acceptable dépend de nombreux paramètres liés au procédé et définit le dévers maximal à partir duquel il n'est plus possible de continuer la production sans changer d'orientation (figure 4). (Authelin, 2022) exploite cette méthode pour proposer une définition d'entités en FA, en ajoutant

des règles à appliquer lorsque plusieurs découpages sont possibles. Cette proposition de définition, conçue pour les procédés DED multi-axes, permet de générer des entités qui sont, par définition, fabricables du point de vue du porte-à-faux maximal. De plus, pour un angle de dévers maximal donné, toutes les géométries sont alors décomposables.

En revanche, elle semble peu adaptée pour la production de pièces en 5 axes continus. En effet, là où il serait possible de réorienter la pièce pour la produire de façon

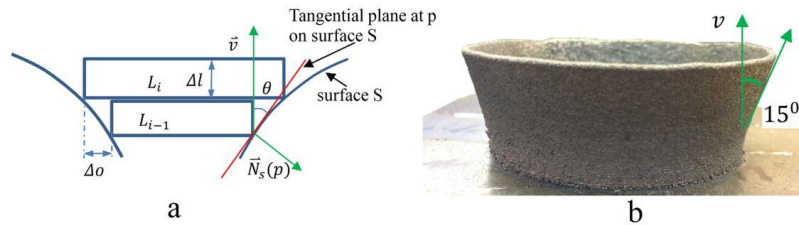


Figure 4 : Définition de l'angle de dévers par (Ding, 2017)

continue, cette méthode la décomposerait en une suite d'entités avec des réorientations successives. Enfin, cette définition pourrait être considérée comme trop spécifique puisque l'angle de dévers maximal, en plus de n'être qu'un critère de fabricabilité parmi d'autres, dépend de chaque procédé et impacte la décomposition d'une pièce en entités.

### 3 Proposition de définition

Comme dans le cas de l'usinage, la définition des entités en FA doit être structurée pour prendre en compte des notions de différents niveaux, de la conception à la production d'une pièce, et ce pour les différents procédés de FA. Pour cela, en nous basant sur la structure de la norme ISO 14649, nous proposons une définition générale d'entité de FA, indépendante du procédé et des paramètres de production. De façon analogue à ce qui est établi pour l'usinage, les entités liées aux différents procédés de FA (DED, LPBF, etc.) sont décrites dans des sous-parties distinctes pour chaque technologie. Ces définitions et les attributs qui y sont associés permettent de structurer et d'intégrer les spécificités des procédés de FA qui sont décrites dans les parties suivantes.

- Une entité de fabrication additive est définie comme la combinaison d'une géométrie avec les propriétés du ou des matériaux qui la constituent.
- Une entité de DED est définie comme une entité de fabrication additive qui puisse être produite avec un procédé DED. Cette définition est complétée par des attributs liés au procédé et à sa production.

#### 3.1 Caractéristiques matériaux

Contrairement à l'usinage, où les caractéristiques du matériau de l'entité sont choisies avant la production (choix du brut) ou après (traitement thermique ou de surface), les caractéristiques matériaux des entités de FA (microstructure et porosité notamment) sont directement générées pendant la production ou après. En effet, celles-ci sont liées à la fois au matériau d'apport (qui peut changer en cours de fabrication) et aux paramètres de production (puissance, vitesse d'avance, etc. (Brehier, 2021)). Cette spécificité doit être intégrée à la définition générale d'entité en FA en indiquant les caractéristiques locales souhaitées pour chaque entité. Cela doit permettre d'adapter la gamme et les paramètres de fabrication pour respecter les spécifications du matériau et donc de la pièce.



### 3.2 Fabricabilité et procédés

Conformément à la définition générale d'une entité, celle-ci doit correspondre à une géométrie pour laquelle il existe un procédé de fabrication connu. Il est donc nécessaire d'assurer que le découpage d'une pièce génère des sous-volumes fabricables par le procédé choisi, en définissant des critères de fabricabilité. Dans le cas de la définition d'entité en DED, le porte-à-faux maximal est un critère de fabricabilité pertinent qui permet également de distinguer les entités produites en 3 axes (sans dépassement du porte-à-faux maximal), en 5 axes positionnés (avec un nombre fini de dépassements du porte-à-faux maximal, correspondant aux réorientations de la pièce) et en 5 axes continus (sans limites de réorientation). Cela permet alors d'exclure les sous-volumes qui ne respectent pas ces critères pour assurer que les entités définies soient fabricables.

### 3.3 Substrat

Le substrat est conventionnellement défini comme l'élément sur lequel un autre élément est ajouté par FA. Il existe ainsi des substrats à différentes échelles, de l'échelle locale (le cordon qui sert de substrat au suivant) à l'échelle globale (le support initial sur lequel la pièce entière est produite) en passant par des niveaux intermédiaires (support d'entité, de couche, etc.). On notera ici que le substrat initial est différent des autres puisque c'est le seul qui n'est pas directement intégré dans la gamme de fabrication car produit en amont, avec potentiellement un autre procédé. Au niveau des entités, le substrat a un impact direct sur la stratégie de production, comme nous avons pu le voir avec les logiciels de FAO. Le substrat de l'entité peut être défini par la surface de ladite entité qui est en contact avec une autre et ainsi être intégré à la définition d'entité en FA. On notera cependant qu'avant la génération de gamme, l'ordre de production des entités n'étant pas connu, la notion de substrat n'est pas pertinente puisqu'on ne sait pas quelle entité s'appuie l'autre. La notion de lien topologique (non orienté) entre entités est alors privilégiée.

### 3.4 Indicateurs thermiques

La thermique a une importance toute particulière en FA, que ce soit pour contrôler la microstructure, réduire la porosité, limiter les déformations ou maintenir le procédé stable (DebRoy, 2018). Il peut ainsi être pertinent d'intégrer des caractéristiques thermiques dans la définition d'entités en FA pour adapter la gamme de fabrication à ces contraintes. Cependant, le principal obstacle à cette intégration est la difficulté à prédire le comportement thermique de la matière lors de la production, et ce pour l'ensemble des entités possibles. En effet, les simulations associées requièrent actuellement de nombreux paramètres ainsi que de longs temps de calcul. Toutefois, il est possible d'intégrer la notion de thermique à celle d'entité avec des critères simples et efficaces, basés sur la géométrie des entités pour discriminer les différentes situations. Pour cela, nous proposons d'utiliser trois paramètres représentatifs des échanges thermiques au niveau de l'entité : son volume (lié à sa capacité thermique et à l'apport d'énergie), ses surfaces en contact avec d'autres entités (liées à des échanges par conduction) et ses surfaces libres, en contact avec l'air ambiant (liées à des échanges par convection et radiation). L'objectif

est d'estimer le comportement thermique global de l'entité par le biais d'indicateurs basés sur ces trois paramètres. Ils sont pour cela comparés à des valeurs de référence pour déterminer à quel type de comportement thermique correspond l'entité. Ces valeurs de référence dépendent principalement des paramètres du matériau (capacité thermique, conductivité, etc.) et devront être estimées par une étude expérimentale.

Nous proposons ici de définir deux indicateurs : le premier quantifie le rapport entre le volume de l'entité et sa surface totale et le second quantifie le rapport entre la surface

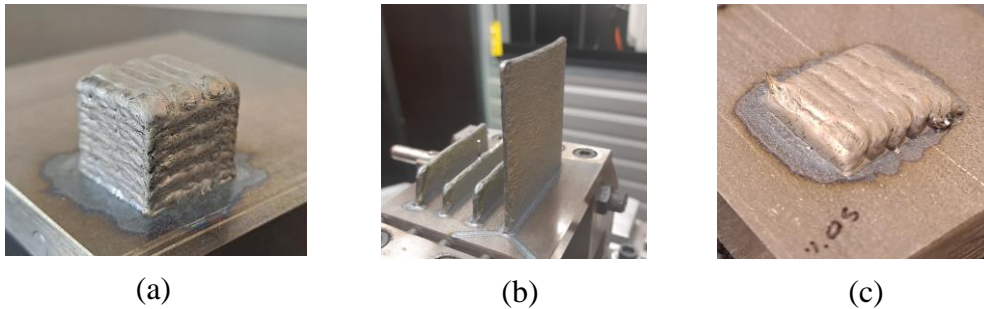


Figure 5 : Exemple d'entités avec pour caractéristiques des comportements thermiques dits d'accumulation (a), de convection (b), de conduction (c)

libre et la surface de conduction. On peut ainsi définir trois types d'entités, correspondant aux différents comportements thermiques possibles :

- Les entités d'accumulation (figure 5.a) ont des géométries massives qui favorisent l'accumulation de chaleur. Elles sont caractérisées par un grand volume pour une faible surface totale.
- Les entités de convection (figure 5.b) ont des géométries élancées qui favorisent la dissipation de chaleur, par convection et rayonnement. Elles sont caractérisées par une grande surface libre par rapport à la surface de conduction.
- Les entités de conduction (figure 5.c) ont des géométries étalées qui favorisent la conduction de la chaleur dans le substrat. Elles sont caractérisées par une grande surface de conduction par rapport à la surface libre.

Cette distinction sur le comportement thermique présupposé, porté au niveau des entités, permet de catégoriser en différents comportements les échanges de chaleur au sein de la pièce au cours de la production et donc d'aider à la génération de gamme. Cette méthode a l'avantage d'être très simple à calculer et de ne nécessiter que des paramètres disponibles dès la conception de la pièce, à savoir la géométrie de l'entité (pour les indicateurs) et le ou les matériaux choisis (pour les valeurs de référence). Du point de vue de la définition d'entité en FA, il est donc possible de tenir compte au plus tôt d'un comportement thermique présupposé par le calcul d'indicateurs basés sur trois paramètres géométriques élémentaires (volume, surface libre et surface de conduction).

#### 4 Conclusion

Alors qu'aucune définition d'entité en FA n'est admise par la communauté ou intégrée à la norme ISO, plusieurs pistes ont été explorées dans la littérature pour fournir une définition d'entité en DED. Parmi les éléments à prendre en compte dans cette définition, on trouve la structure générale de la norme, les notions de procédés, de fabricabilité, de substrat et de matériaux. Considérant l'importance de la thermique en FA, nous y avons ajouté le comportement thermique de l'entité. Pour cela, étant donné la

complexité physique et le coût de calcul très élevé nécessaire pour faire un bilan thermique réaliste pour chaque entité, nous proposons de construire des indicateurs représentatifs des échanges entre les entités et avec le milieu ambiant basés uniquement sur des paramètres géométriques. Ces indicateurs pourront par la suite être exploités pour aider à la génération de gamme de fabrication.

## Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR AWESOME (ANR-21-CE10-0013).

## Références

- ISO 14649-10 Systèmes d'automatisation industrielle et intégration - Commande des dispositifs physiques - Modèle de données pour les contrôleurs numériques informatisés - Partie 10 : données des procédés généraux.
- ISO 10303-224 Systèmes d'automatisation industrielle et intégration - Représentation et échange de données de produits - Partie 224 : définition de produits mécaniques pour la planification de procédés utilisant des caractéristiques d'usinage.
- ISO/ASTM 52900 Fabrication additive - Principes généraux - Fondamentaux et vocabulaire.
- Authelin, O. (2022). *Méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus*. PhD thesis, É. C. de Nantes.
- Bonnard, R. (2010). *Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive*. PhD thesis, É. C. de Nantes.
- Bourdet, P., & Villeneuve, F. (1990). *La gamme automatique en usinage [séminaire, Ecole normale supérieure de Cachan, 21 et 22 novembre 1990]*. Paris: Hermès, C 1990.
- Bréhier, M., Weisz-Patrault, D., Tournier, C. (2021) Revisiting the influence of the scanning speed on surface topography and microstructure of IN718 thin walls in directed energy deposition additive manufacturing, *Procedia CIRP*, 108: 470-476
- DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J., Mukherjee, T., Elmer, J., . . . Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92(C): 112-224.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Larkin, N., and van Duin, S. (2016). Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated, Manufacturing*, 37:139–150.
- Ding, Y., Dwivedi, R., and Kovacevic, R. (2017). Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44: 67–76.
- Douin, C., Gruhier, E., Kromer, R., Christmann, O. & Perry, N. (2022). A method for design for additive manufacturing rules formulation through Spatio-temporal process discretization. *Procedia CIRP*, 109: 484-489.
- Feenstra, D., Banerjee, R., Fraser, H., Huang, A., Molotnikov, A. & Birbilis, N. (2021). Critical review of the state of the art in multi-material fabrication via directed energy deposition. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 25(4): 100924.
- Mussatto, A. (2022). Research progress in multi-material laser-powder bed fusion additive manufacturing: A review of the state-of-the-art techniques for depositing multiple powders with spatial selectivity in a single layer. *Results in Engineering*, 16: 100769.
- Poudel, A., Yasin, M., Ye, J., Liu, J., Vinel, A., Shao, S., & Shamsaei, N. (2022). Feature-based volumetric defect classification in metal additive manufacturing. *Nature Com.*, 13(1), 6369.
- Singh, P. and Dutta, D. (2001). Multi-direction slicing for layered manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(2): 129–142.16
- Wang, X., Chen, L., Lau, T.-Y., and Tang, K. (2020). A skeleton-based process planning framework for support-free 32-axis printing of multi-branch freeform parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(1-2): 327–350.
- Xie, F., Jing, X., Zhang, C., Chen, S., Bi, D., Li, Z., He, D., and Tang, K. (2022). Volume decomposition for multi-axis support-free and gouging-free printing based on ellipsoidal slicing. *Computer- Aided Design*, 143: 103135.