
**Fabrication additive — Conception
— Fabrication additive à gradient
fonctionnel**

*Additive manufacturing — Design — Functionally graded additive
manufacturing*

iTeh Standards
(<https://standards.itih.ai>)
Document Preview

[ISO/ASTM TR 52912:2020](https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/7a0129a4-79ae-41e1-bb33-d0c95a1b8f1d/iso-astm-tr-52912-2020)

<https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/7a0129a4-79ae-41e1-bb33-d0c95a1b8f1d/iso-astm-tr-52912-2020>



Numéro de référence
ISO/ASTM TR 52912:2020(F)

© ISO/ASTM International 2020

iTeh Standards
(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

[ISO/ASTM TR 52912:2020](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/7a0129a4-79ae-41e1-bb33-d0c95a1b8f1d/iso-astm-tr-52912-2020)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/7a0129a4-79ae-41e1-bb33-d0c95a1b8f1d/iso-astm-tr-52912-2020>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO/ASTM International 2020

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou un intranet, sans autorisation écrite soit de l'ISO à l'adresse ci-après, soit d'un organisme membre de l'ISO dans le pays du demandeur. Aux États-Unis, les demandes doivent être adressées à ASTM International.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11

E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

ASTM International
100 Barr Harbor Drive, PO Box C700
West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
Tél.: +610 832 9634
Fax: +610 832 9635
E-mail: khooper@astm.org
Web: www.astm.org

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
Introduction	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Abréviations	1
5 Concept de la fabrication additive à gradient fonctionnel (FGAM)	3
5.1 Généralités.....	3
5.2 Compositions homogènes — FGAM mono-matériau.....	4
5.3 Compositions homogènes — FGAM multi-matériaux.....	4
6 Progrès de la fabrication additive à gradient fonctionnel	8
6.1 Généralités.....	8
6.2 Procédé de FA et de FGAM.....	8
6.3 Extrusion de matière.....	10
6.4 Fusion sur lit de poudre.....	12
6.5 Dépôt de matière sous énergie concentrée.....	14
6.6 Stratification de couches.....	15
7 Limitations actuelles de la FGAM	17
7.1 Généralités.....	17
7.2 Limitations du matériau.....	17
7.2.1 Généralités.....	17
7.2.2 Définition de la distribution optimale des propriétés du matériau.....	18
7.2.3 Prédiction des propriétés matérielles des composants fabriqués.....	18
7.2.4 Sélection du matériau.....	18
7.2.5 Compréhension des différences et définition des tolérances.....	18
7.3 Limitations des technologies actuelles de fabrication additive.....	19
7.4 Limitations des logiciels de CAO.....	19
7.4.1 Généralités.....	19
7.4.2 Formats d'échange de données.....	20
8 Applications potentielles de la FGAM	22
8.1 Généralités.....	22
8.2 Applications biomédicales.....	23
8.3 Applications aérospatiales.....	23
8.4 Marchés grand public.....	23
9 Résumé	24
Bibliographie	25

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir <https://www.iso.org/fr/directives-and-policies.html>).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir <https://www.iso.org/fr/iso-standards-and-patents.html>).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: <https://www.iso.org/fr/foreword-supplementary-information.html>.

ISO/ASTM TR 52912:2020

Le présent document a été élaboré par l'ISO/TC 426, *Fabrication additive*, en coopération avec l'ASTM F 42, *Technologies de fabrication additive*, dans le cadre d'un accord de partenariat entre l'ISO et ASTM International dans le but de créer un ensemble commun de normes ISO/ASTM sur la fabrication additive et en collaboration avec le Comité Européen de Normalisation (CEN), Comité technique CEN/TC 438, *Fabrication additive*, conformément à l'Accord de coopération technique entre l'ISO et le CEN (Accord de Vienne).

Il convient que tout retour d'information ou questions sur le présent document soit adressé à l'organisme national de normalisation de l'utilisateur. Une liste complète de ces organismes peut être consultée à l'adresse www.iso.org/members.html.

Introduction

Les matériaux à gradient fonctionnel (FGMs) ont été développés en 1984 pour un projet d'avion spatial pour soutenir les barrières thermiques élevées pour surmonter les défauts des matériaux composites traditionnels (matériaux AZO, 2002). Les composites traditionnels [Figure 1 a)] sont des mélanges homogènes, impliquant par conséquent un compromis entre les propriétés souhaitables des matériaux constitutifs. Les matériaux à gradient fonctionnel (FGMs) sont une classe de matériaux avancés dont la composition varie dans l'espace sur une dimension changeante, avec des changements correspondants dans les propriétés des matériaux incorporés[56]. Les FGMs atteignent leur statut multifonctionnel en associant les exigences de performance à des stratégies de structuration et d'allocation du matériau [Figure 1 b)].

Les procédés de fabrication des FGMs conventionnels comprennent le grenailage de précontrainte, l'implantation ionique, la projection thermique, le dépôt électrophorétique et le dépôt chimique en phase vapeur. Comme les procédés de fabrication additive construisent des pièces par ajouts successifs de matériaux, ils offrent la possibilité de réaliser des produits ayant des propriétés à gradient fonctionnel, introduisant ainsi le concept souvent connu sous le nom de fabrication additive à gradient fonctionnel (FGAM). Comme ce domaine de travail est nouveau, conduit par la recherche universitaire et qu'il manque de normalisation disponible, plusieurs noms différents ont été proposés par différents chercheurs dans différentes publications comme termes pour ce domaine, par exemple, prototypage rapide à gradient fonctionnel (FGRP)[56], prototypage rapide à propriétés variées (VPRP) [57] et fabrication additive à propriétés spécifiques au site[72]. Toutefois, même s'il existe clairement un besoin important de clarification des termes clés associés à la FGAM, le présent document ne contient aucune tentative d'alignement terminologique. Le présent document est une présentation générale de l'État de l'Art et des possibilités offertes à la FGAM par la technologie actuelle du procédé de FA, et constitue donc un document purement informatif. Du fait que cette présentation générale s'appuie sur les publications disponibles, et afin de faciliter les références croisées à partir de ces publications, le présent document a utilisé les termes concernant la FGAM tels qu'ils sont utilisés dans les publications originales.



Figure 1 — Allocation de matériaux dans un composite traditionnel et un composite FGM

Fabrication additive — Conception — Fabrication additive à gradient fonctionnel

1 Domaine d'application

L'utilisation de la fabrication additive (FA) permet la fabrication de composants géométriquement complexes en déposant des matériaux avec exactitude et de manière contrôlée. Les progrès technologiques dans le domaine du matériel, des logiciels de FA, ainsi que l'ouverture de nouveaux marchés exigent une plus grande flexibilité et une plus grande efficacité des produits actuels, ce qui encourage la recherche de matériaux nouveaux dotés de capacités à gradient fonctionnel et de hautes performances. Cela a été désigné par la fabrication additive à gradient fonctionnel (FGAM), une technique de fabrication couche par couche qui consiste à faire varier graduellement le rapport de l'organisation du matériau au sein d'un composant pour répondre à une fonction prévue. Comme la recherche dans ce domaine a gagné en intérêt dans le monde entier, les interprétations du concept de FGAM exigent une plus grande clarification. L'objectif du présent document est de présenter une compréhension conceptuelle de la FGAM. L'État de l'Art actuel et les capacités actuelles de la technologie de FGAM seront examinés, ainsi que ses obstacles et limites technologiques. Les formats d'échange de données et certaines applications récentes sont ici évalués, suivis de recommandations sur les stratégies possibles pour surmonter les obstacles et les orientations futures pour le décollage de la FGAM.

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>

4 Abréviations

FA	Fabrication Additive (voir l'ISO/ASTM 52900)
AMF	Format de fabrication additive (Additive Manufacturing Format), voir 8.4.2.1 (voir l'ISO/ASTM 52900)
CAO	Conception Assistée par Ordinateur ^[48]
IAO	Ingénierie Assistée par Ordinateur ^[14]
DED	Dépôt de matière sous énergie concentrée (Directed Energy Deposition), voir Article 6 (voir l'ISO/ASTM 52900)
DMLS	Frittage laser direct de métal (Direct Metal Laser Sintering), le nom du procédé de fusion laser sur lit de poudre métallique par EOS GmbH ^[40]

EBM	Fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting), le nom du procédé de fusion par faisceau d'électrons sur lit de poudre métallique par Arcam AB ^[40]
FAV	Voxel travaillable (Fabricatable Voxel), voir 8.4.2.2 ^[19]
FEA	Analyse par éléments finis (Finite Element Analysis) ^[48]
FEF	Fabrication par extrusion sous forme lyophilisée (Freeze-form Extrusion Fabrication), un procédé d'extrusion de matière basé sur l'extrusion de matières premières sous forme de pâtes et l'application de la lyophilisation pour former une ébauche qui peut être consolidée aux propriétés souhaitées du matériau par frittage. Actuellement utilisée uniquement pour des projets de recherche et de développement ^[34] .
FEM	Méthode par éléments finis (Finite Element Method) ^[18]
FDM	Modélisation par dépôt fondu (Fused Deposition Modelling), nom donné aux procédés d'extrusion de matière par Stratasys Ltd ^[39] .
FGAM	Fabrication additive à gradient fonctionnel (Functionally Graded Additive Manufacturing) ^[61] .
FGMs	Matériaux à gradient fonctionnel (Functionally Graded Materials) ^[61] .
FGRP	Prototypage rapide à gradient fonctionnel (Functionally Graded Rapid Prototyping), nom de la FGAM utilisé par Neri Oxman dans certaines publications ^[56] .
LMD	Dépôt de métal par laser (Laser Metal Deposition), un nom commun pour les procédés de dépôt de matière sous énergie concentrée qui utilisent le laser comme source d'énergie pour faire fondre et fusionner les matériaux métalliques au moment de leur dépôt, voir l'Article 6 ^[21] .
LOM	Fabrication d'objet stratifié (Laminated Object Manufacturing), nom des procédés de stratification de couches développés à l'origine par Helisys Inc. ^[42]
MMAM	Fabrication additive multi-matériaux (Multi-Material Additive Manufacturing), nom utilisé pour la FA lorsque plusieurs matériaux sont utilisés dans le même procédé ^[61] .
MM FGAM	Fabrication additive à gradient fonctionnel multi-matériaux (Multi-Material Functionally Graded Additive Manufacturing), nom de la FGAM lorsque le gradient fonctionnel est basé sur des pièces de construction utilisant plus d'un matériau dans le même procédé, et que la composition des différents composants matériels est commandée par le programme informatique ^[43] .
PBF	Fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion) (ISO/ASTM 52900)
SHS	Frittage thermique sélectif (Selective Heat Sintering), nom d'un procédé de fusion sur lit de poudre qui permet de faire fondre une poudre de polymère au moyen d'une tête d'impression thermique au lieu du laser, plus courant. Le procédé a été développé à l'origine par Blueprinter mais a été retiré du marché suite à la faillite de cette société ^[40] .
SLM	Fusion sélective au laser (Selective Laser Melting), nom du procédé de fusion sur lit de poudre métallique par laser, développé à l'origine en collaboration par F&S Stereolithotechnik GmbH (Fockele & Schwarze) et Fraunhofer Institute pour la technologie laser. Ce nom est actuellement une marque déposée de SLM Solutions Group AG et Realizer GmbH ^[40] .

SLS	Frittage laser sélectif (Selective Laser Sintering), nom du procédé de fusion sur lit de poudre développé à l'origine par DTM Corp, mais qui a été repris par 3D Systems par l'acquisition de cette société. Comme il s'agit du premier procédé de fusion sur lit de poudre à être commercialisé, il a parfois été utilisé comme synonyme de tous les procédés de fusion sur lit de poudre ^[40] .
STL	Stéréolithographie, nom d'un format de fichier numérique pour les modèles solides tridimensionnels développé à l'origine pour le procédé de stéréolithographie par 3D Systems, d'où le nom. Depuis que cette conversion vers ce format a été couramment disponible dans plusieurs programmes de CAO, ce format de fichier a jusqu'à présent fonctionné efficacement comme une norme de facto pour les procédés de FA. (voir l'ISO/ASTM 52900)
UAM	Fabrication additive par ultrasons (Ultrasonic Additive Manufacturing), nom d'un procédé de stratification de couches de métal par Fabrisonic LLC. Ce procédé consiste à fusionner de fines feuilles (ou rubans) de métal par des vibrations ultrasoniques ^[43] .
VDM	Modélisation discrète vague (Vague Discrete Modelling) ^[8]
VPRP	Prototypage rapide à propriétés variables (Variable Property Rapid Prototyping), nom de la FGAM utilisé par Neri Oxman dans certaines publications ^[57] .
3MF	Format de fabrication 3D, un format de fichier numérique pour les modèles solides tridimensionnels dans la fabrication additive, développé par le consortium 3MF, voir 8.4.2.3 ^[3] .

5 Concept de la fabrication additive à gradient fonctionnel (FGAM)

5.1 Généralités

La fabrication additive (FA) est un procédé d'adhésion de matières pour fabriquer des *pièces* à partir de données de modèles 3D, généralement *couche* après *couche*, par opposition à la fabrication soustractive et aux méthodes de fabrication par mise en forme (ISO/ASTM 52900). La FA permet la fabrication directe de composants sur mesure très détaillés en plaçant avec exactitude le ou les matériaux à des positions définies au sein d'un domaine de conception sous la forme d'une unité unique^[76]. L'utilisation de la FA a donné la possibilité de produire des pièces en utilisant des FGM par le biais d'un procédé connu sous le nom de fabrication additive à gradient fonctionnel (FGAM). Les technologies de FA adaptées à la fabrication des FGM comprennent l'extrusion de matière, le dépôt de matière sous énergie concentrée, la fusion sur lit de poudre, la stratification de couches^[43] et la technologie PolyJet.

La fabrication additive à gradient fonctionnel (FGAM) est une technique de fabrication couche par couche qui modifie intentionnellement les paramètres du procédé et fait varier graduellement l'organisation spatiale du ou des matériaux au sein d'un composant en vue de répondre à la fonction prévue.

La FGAM offre une voie simplifiée pour passer de l'idée à la réalité. L'émergence de la FGAM offre le potentiel d'accomplir des structures élaborées plus efficacement. L'objectif de l'utilisation de la FGAM est de fabriquer des composants à forme libre basés sur les performances et pilotés par le comportement de leur ou leurs matériaux à gradient. Contrairement à la FA conventionnelle mono et multi-matériaux, qui se concentre principalement sur le prototypage centré sur la forme, la FGAM est un procédé de fabrication centré sur le matériau qui signifie un passage de la modélisation des contours à la modélisation des performances. L'intégration directe de la fonctionnalité pilotée par les performances dans le matériau est un avantage fondamental et une amélioration significative par rapport aux technologies de FA. Un exemple comprend des caractéristiques internes hautement personnalisables avec des fonctionnalités intégrées qu'il serait impossible de produire en utilisant la fabrication conventionnelle^[5]. La quantité, le volume, la forme et l'emplacement du renfort dans la matrice du matériau peuvent être commandés avec précision afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour une application spécifique^[18].

La Référence ^[57] décrit le concept de FGAM comme une méthode de prototypage rapide à propriétés variables (VPRP) qui est capable de commander stratégiquement la masse volumique et la

caractéristique directionnelle de la substance d'un matériau dans une distribution 3D complexe afin de produire un niveau élevé d'intégration continue de la structure monolithique en utilisant la même machine. Les caractéristiques et les propriétés du matériau sont modifiées en changeant la composition, la phase ou la microstructure avec un emplacement prédéterminé. La composition potentielle des matériaux réalisables par la FGAM peut être caractérisée en 3 types:

- a) densification variable au sein d'une composition homogène;
- b) composition hétérogène par la combinaison simultanée de deux matériaux ou plus par le biais d'une transition progressive;
- c) utilisation d'une combinaison de densification variable au sein d'une composition hétérogène.

Ces trois types de caractéristiques sont décrits en [5.2](#) et [5.3](#).

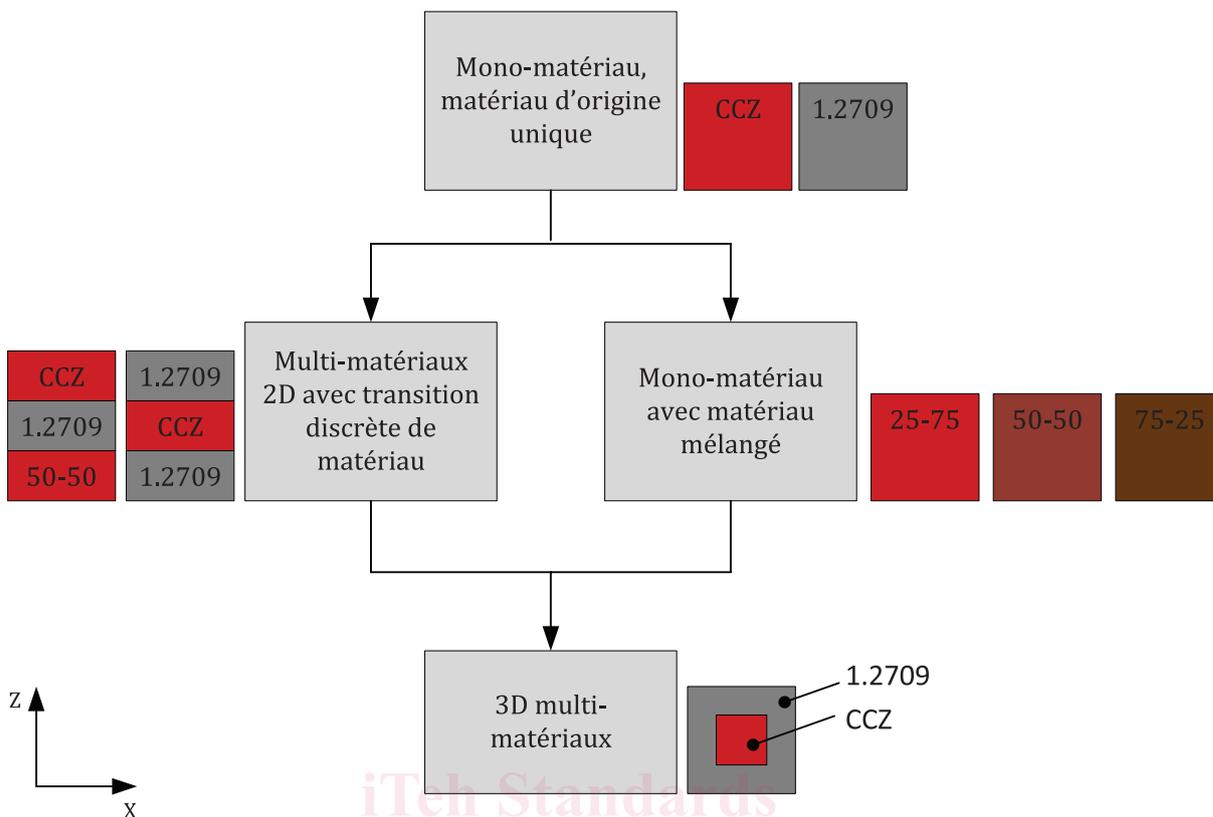
5.2 Compositions homogènes — FGAM mono-matériau

La FGAM peut produire des structures conçues efficacement en modulant stratégiquement la position spatiale (par exemple, la masse volumique et la porosité) et la morphologie des structures en treillis à travers le volume du matériau en vrac^[43]. Nous appelons cela la FGAM à densification variée (également connue sous le nom de FGAM à gradient de porosité). La Référence [\[56\]](#) a proposé celle-ci sous la forme d'une fabrication rapide d'inspiration biologique qui se produit dans la nature, comme les gradients de masse volumique radiale des palmiers, la structure trabéculaire spongieuse de l'os et la variation tissulaire du muscle qui est hétérogène en élasticité et en rigidité. La directivité, l'amplitude et la concentration de masse volumique de la substance du matériau dans une structure composite monolithique anisotrope contribuent à des déviations fonctionnelles en vue de moduler les propriétés physiques et de créer des formes fonctionnelles par le biais de la hiérarchie structurelle^[54].

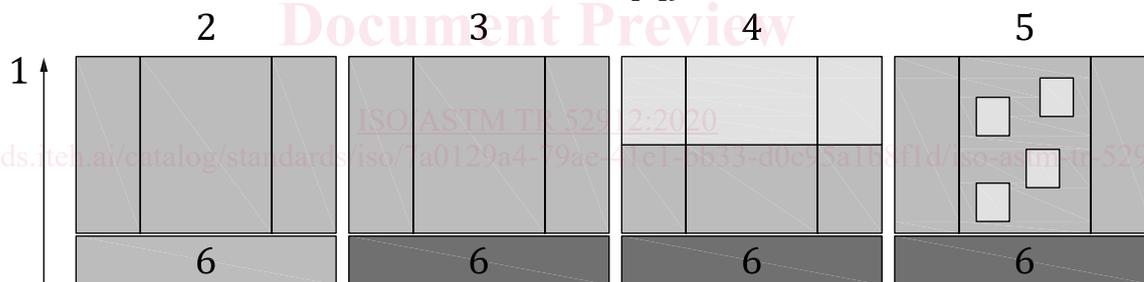
Les structures artificielles telles que les piliers en béton sont généralement homogènes sur le plan volumétrique^[27]. La FGAM mono-matériau à densification variée a été démontrée par le biais des travaux de Steven Keating sur du béton à gradient fonctionnel fabriqué par une machine MakerBot avec une extrudeuse de matière modifiée. La pièce en béton présentait un gradient fonctionnel de masse volumique pour imiter les structures cellulaires d'un palmier, depuis un extérieur solide jusqu'à un noyau poreux. Le gradient de porosité a été obtenu en faisant varier les tailles des particules de poudre qui ont été attribuées à différents endroits au cours du procédé de gradation ou en faisant varier les paramètres du procédé de production^[43]. Pour la Référence [\[27\]](#), la masse volumique a été commandée en agrégeant le taux d'eau du béton à un endroit donné, ce qui a conduit à un excellent rapport résistance/poids, le rendant plus léger et pourtant plus efficace et plus résistant qu'une pièce en béton plein.

5.3 Compositions homogènes — FGAM multi-matériaux

La fabrication additive multi-matériaux (MMAM) peut être réalisée à l'aide d'imprimantes 3D conventionnelles dotées de plusieurs buses afin de délivrer différents matériaux à la plate-forme^[77]. Dans la fusion sur lit de poudre, la MMAM peut être réalisée en utilisant un dispositif de distribution classique en combinaison avec un module d'aspiration pour retirer la poudre après l'étape de solidification^[7]. Comme il existe des interfaces nettes dans la majorité des composites MMAM conventionnels où deux matériaux se rencontrent et interagissent, cela crée une phase cassante^[72]. La défaillance est généralement provoquée entre des modifications discrètes des propriétés des matériaux, comme le délaminage ou les fissures causées par la tension superficielle entre deux matériaux^[17]. La FGAM multi-matériaux (MM) vise à améliorer la liaison interfaciale en supprimant les frontières distinctes entre des matériaux dissemblables ou incompatibles. Les concentrations de contraintes mécaniques et les contraintes thermiques causées par les différents coefficients de dilatation seront largement réduites^[72]. Les [Figures 2, a\) et b\)](#) expliquent l'approche de voxellisation de la fabrication additive multi-matériaux selon la Référence [\[7\]](#).



a) Schéma conceptuel illustrant les voxels disposés sous forme 3D (Fraunhofer IGCV et Référence [7])



b) Illustration de la MMAM (Fraunhofer IGCV et Référence [7])

Légende

- 1 direction de fabrication
- 2 mono-matériau
- 3 2D hybride
- 4 2D multi-matériaux
- 5 3D multi-matériaux
- 6 substrat

Figure 2 — Voxellisation de la fabrication additive multi-matériaux