

Conseil scientifique de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS)

Recommandation

Technologies de Fabrication Additive

Lors de la première session du CSI de l'INSIS en janvier 2019, celui-ci s'est vu proposer une mission de réflexion sur les questions scientifiques liées aux technologies de fabrication additive (abrégé FA ci-après) et sur les contributions possibles de l'INSIS pour y répondre. Le but de cette note est donc de recenser les principaux défis scientifiques associés à la FA concernant les sections pilotées par l'INSIS et de proposer des pistes d'actions concrètes.

Un contexte hétérogène lié à la multiplicité des matériaux et procédés.

Les technologies de FA sont définies comme « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique » (NF E 67-001). Cette définition générique masque une grande hétérogénéité, en termes de matériaux et de procédés associés d'une part, en termes d'applications d'autre part.

Ainsi, historiquement les premiers matériaux mis en œuvre par FA ont été les polymères. Le CNRS a d'ailleurs été précurseur avec le premier brevet décrivant la stéréo-lithographie en 1984. Les procédés FA appliqués aux céramiques et aux matériaux métalliques sont plus récents. Émergents au début des années 2000, ils connaissent actuellement la croissance la plus importante en termes d'applications et d'investissement industriels. Dans cette dynamique actuelle, le CNRS et en particulier l'INSIS jouent un rôle structurant à l'échelle nationale et internationale, avec notamment quatre initiatives lancées en 2020 :

- Le GDR « Alliages métalliques par/pour la fabrication additive »¹.
- La 1^{ère} École Thématique « Fabrication Additive des alliages métalliques »²
- Le GIS HEAD « Fabrication additive à hautes énergies (métaux et céramiques) »³
- L'IRP AMHELIE « Additive manufacturing for high performance materials and lattice structures »⁴

En comparaison, la dynamique de recherche sur les procédés appliqués aux polymères est actuellement moins structurée au niveau national, mais peut s'appuyer sur différents pôles régionaux avec un leadership plus industriel. Le CNRS est présent à travers les UMRs participant à ces pôles, mais aussi grâce à ses réseaux métier. Le réseau des mécaniciens a notamment organisé une école technologique « Procédés de fabrication additive : règles et méthodes » en 2017. Plus récemment, dans les premiers mois de la crise COVID 19, ces

¹ GDR2089 (alma.cnrs.fr) porté par l'Institut de chimie, l'INSIS étant institut porteur secondaire.

² Ecole Thématique FABADD prévue en mai 2020

³ GIS HEAD

⁴ International Research Network AMHELIE impliquant deux universités australiennes.

réseaux métier ont permis de coordonner la production décentralisée de visières de protection en plastique.

Enfin, les laboratoires du CNRS sont présents dans des domaines d'application émergents des technologies de FA tels que l'impression 4D (en particulier à travers le bioprinting⁵ et la FA appliquée aux biocomposites⁶), la construction, la microélectronique, les réacteurs intensifiés... qui dans leur diversité illustrent le **rôle de « game changer »** de la FA qui « change la donne » en rendant possible de produire (et donc d'imaginer) des objets aux formes plus complexes, conçus à façon pour les besoins de l'industrie mais aussi de la recherche. En effet, la lecture des rapports de conjoncture et de prospective des sections du CoNRS liées à l'INSIS (8, 9, 10, 28) montrent que toutes considèrent la FA comme **un outil incontournable**. Néanmoins, dans le même temps, aucune de ces sections n'identifie la FA comme une de ses thématiques scientifiques propres. Les sections les plus impliquées y voient plutôt **un domaine interdisciplinaire qui invite à revisiter les thématiques scientifiques existantes**⁷.

Des défis scientifiques génériques concernant l'INSIS

Dans ce contexte hétérogène, nous nous sommes donné pour objectif de dégager des questions scientifiques communes aux différents matériaux et procédés. Nous avons ainsi identifié trois défis issus des verrous rencontrés par les industriels développant la FA à des TRL élevés (dynamique « industrial pull ») et/ou de questionnements plus amont émergeant dans les laboratoires (dynamique « scientific push »).

- 1. Comprendre et maîtriser les écoulements complexes des matières à différentes échelles lors des procédés.** La rhéologie est en effet très dépendante de la nature des différentes matières mises en œuvre (poudres, filaments, fluides), avec une complexité variable (matières mono- ou multiphasiques (encres, composites), avec ou sans changement de phase, fluides à seuil ou réactifs...). Cette variété des matières influence aussi les couplages à prendre en compte avec d'autres propriétés (thermiques, mécaniques, compétition tension de surface/viscosité...) et les échelles à considérer spécifiquement (rôle du champ de cisaillement local en bioprinting par exemple). Un objectif commun serait de **développer une ingénierie inverse de la formulation des matières**.
- 2. Maîtriser les changements de phase pour passer du contrôle de la forme 3D à celle de la microstructure.** Ce défi répond aux préoccupations industrielles concernant les défauts spécifiques aux pièces produites en FA (défauts de surface, vides, taille des grains, interfaces et interphases) et les faiblesses pouvant en résulter en termes de performance et de durabilité (fatigue, corrosion). À plus long terme, il permet de **viser le développement matériaux « by design », architecturés jusqu'à la microstructure** (anisotropie, gradients, impression 4D, métamatériaux).

⁵ voir la recommandation du CSI INSIS de 2016

⁶ Mis en évidence par le 1^{er} colloque national dédié à la FA composites en 2020 (<https://fabaddcomp.sciencesconf.org>)

⁷ « un domaine interdisciplinaire de par les défis scientifiques qu'il aborde (...) dont beaucoup sont au cœur de la section » (section 9, 2014) ; « La thermique occupe une place importante dans l'étude des procédés de fabrication additive ». Section 10, 2019).

3. **Développer la simulation pour concevoir l'objet numérique initial et pour le contrôle en temps réel des procédés.** Du point de vue industriel, l'objectif déclaré est de **parvenir à un chaînage complet du modèle numérique à la pièce finale à travers une simulation multiphysique des procédés de FA.** L'aboutissement de ce concept de « **jumeau numérique** » nécessite d'une part de nouveaux modèles multiphysiques et multi-échelles (en particulier adaptés aux matériaux anisotropes, alvéolaires, ou encore aux trajectoires hors du linéaire) et d'autre part de nouvelles méthodes numériques associées à des capteurs performants pour un pilotage « in operando » (réduction de modèles, traitement des données). Parallèlement, la FA permet d'**imaginer une optimisation topologique revisitée incluant le fonctionnement en service et la durabilité des pièces.**

Recommandations

1. **Soutenir et évaluer la valeur ajoutée des initiatives structurantes récentes.** Les trois défis génériques ci-dessus sont en partie identifiés par le GDR ALMA et le GIS HEAD, bien que centrés sur les matériaux métalliques. Ces deux initiatives pourraient donc servir de modèle pour une structuration de l'effort de recherche national en FA pour d'autres matériaux (polymères, composites) tant du point de vue des communautés scientifiques que des infrastructures. Néanmoins, avant d'envisager la création d'autres GDRs, la participation ponctuelle de spécialistes de ces matériaux non métalliques à des séminaires du GDR ALMA, pourrait stimuler la réflexion des communautés concernées sur cette opportunité.
2. **S'appuyer sur l'expérience de l'École thématique FABADD pour l'ouverture progressive à d'autres matériaux.** Focalisée sur les matériaux métalliques, cette école thématique pourrait être renouvelée en évoluant vers une vision plus transversale des technologies de FA. Au-delà du fait que les besoins en formation sont importants pour les différentes familles de matériaux, une école unique permettrait de mettre en avant les questions génériques identifiées. Cela contribuerait à développer une communauté interdisciplinaire en invitant des spécialistes de disciplines actuellement peu ou pas impliquées (ex : rhéologie des fluides géophysiques, IA...)
3. **Dans le cadre de l'année INSIS « La Mécanique du futur », mettre en avant les technologies de fabrication additive sous l'angle des défis scientifiques identifiés.** La FA présente l'avantage d'enjeux économiques et scientifiques forts en particulier dans le domaine de la mécanique et d'une image positive auprès du grand public et particulièrement des étudiants en sciences. Un effet de levier pour les attirer vers la recherche en ingénierie pourrait être ainsi recherché.
4. **Stimuler une réflexion sur le rôle de « game changer » de la FA et son articulation avec le concept de jumeau numérique au sein des sections et développer des synergies avec les réseaux métier.** Les communautés S8 (microfluidique...) et S10 (Génie des procédés...) sont particulièrement concernées.
5. **Soutenir les équipes et les chercheurs INSIS positionnées sur la FA.** La nature interdisciplinaire des recherches de la FA pose la question de leur financement et de leur reconnaissance à long terme pour des chercheurs s'y impliquant.
6. **Développer un réseau d'experts INSIS pour la FA en synergie avec les industriels.** Il s'agit à la fois de permettre l'émergence de questions scientifiques « industrial pull » et d'assurer un soutien au renouveau industriel. Il y a en effet une part importante d'ingénierie nécessaire pour concevoir et construire des équipements adaptés (robotique, outillages complexes).

Serge SIMOËNS

Président du CSI INSIS

Recommandation adoptée le 25 janvier 2021

13 votants : 13 oui, 0 abstention, 0 non

Destinataires :

- M. Antoine PETIT, président-directeur général du CNRS
- M. Alain SCHUHL, directeur général délégué à la science du CNRS
- M. Jean-Yves MARZIN, directeur de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes du CNRS

Copies :

- M. Olivier COUTARD, président de la conférence des présidents du Comité national
- Mme Dorothee BERTHOMIEU, présidente du Conseil scientifique
- M. Dimitry PEAUCELLE, porte-parole de la C3N.
- M. Yaël GROSJEAN, président du Conseil scientifique de l'Institut des sciences biologiques
- M. Olivier SANDRE, président du Conseil scientifique de l'Institut de chimie
- Mme Patricia GIBERT BRUNET, président du Conseil scientifique de l'Institut écologie et environnement
- Mme Nathalie VIENNE- GUERRIN, présidente du Conseil scientifique de l'institut des sciences humaines et sociales
- M. Rémi CARLES, président du Conseil scientifique de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions
- Mme Claudine GILBERT, présidente du Conseil scientifique de l'Institut de physique
- M. Olivier DRAPIER, président du Conseil scientifique de l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions
- Mme Isabelle QUEINNEC, présidente du Conseil scientifique de l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions
- Mme Béatrice MARTICOREN, présidente du Conseil scientifique de l'Institut des sciences de l'Univers
- M. Claude AMRA, président de la Section 8
- Mme Brigitte BACROIX, présidente de la Section 9
- Mme Françoise MASSINES, présidente de la Section 10
- Mme Laurence PRUVOST, présidente de la Section 4
- M. Pierre-Olivier AMBLARD, président de la Section 7
- Mme Monique BERNARD, présidente de la Section 28
- M. Patrice PEYRE, laboratoire procédés et ingénierie en mécanique et matériaux
- M. Thomas JOFFRE, centre technique industriel de la plasturgie et des composites
- M. Christophe MARQUETTE, institut de chimie et de biochimie moléculaires et supramoléculaires
- M. Antoine LE DUIGOU, institut de recherche Dupuy de Lôme
- M. Benoit FURET, laboratoire des sciences du numérique de Nantes
- M. Alain BERNARD, laboratoire des sciences du numérique de Nantes
- M. Jean-Yves HASCOËT, institut de recherche en génie civil et mécanique
- M. Mameth BOUTHOU, INSA de Lyon

Annexe

Liste des personnalités auditionnées

M. Patrice PEYRE (CNRS, Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux, PIIM, UMR 8006), M. Thomas JOFFRE (Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites IPC) et M. Christophe MARQUETTE (CNRS, Institut de Chimie et de Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires, ICBMS, UMR 5246) ont été auditionnés au cours des séances plénières du CSI INSIS.

En parallèle, les personnalités suivantes ont été consultées : M. Antoine LE DUGOU (Université de Bretagne Sud, Institut de Recherche Dupuy de Lôme, UMR 6027), M. Benoit FURET (Université de Nantes, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes, LS2N, UMR 6004), M. Alain BERNARD (Ecole Centrale de Nantes, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes, LS2N, UMR 6004) et M. Jean-Yves HASCOËT (Ecole Centrale de Nantes, Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique, GeM, UMR 6183) et M. Mameth BOUTHOU (INSA de Lyon).