

Préface

Jean-Claude André, qui nous a déjà donné trois très beaux livres sur la fabrication additive, passe à la dimension supérieure ! En effet, avec l'aide de Frédéric Demoly, il nous offre maintenant un ouvrage « encyclopédique » sur la 4D. Rappelons que Jean-Claude André est le premier Français à avoir déposé des brevets et à avoir cru dans ce que l'on appelle maintenant « la fabrication additive » et que l'on appelait juste à l'époque « l'impression 3D ».

La quatrième dimension est celle du temps, il s'agit de réaliser, en fabrication additive, des objets capables de changer de forme ou de fonction au cours du temps. En termes anciens et en simplifiant, on pourrait dire qu'il s'agit d'utiliser en impression 3D des matériaux à mémoire de forme ou déformables sous l'effet de perturbations externes, thermiques, photochimiques, mécaniques ou électromagnétiques. On inclut aussi dans la 4D les biomatériaux, que ce soient des matériaux biocompatibles ou vivants, on parle dans ce dernier cas de *bio-printing*. Ce thème important n'est pas ou peu développé tant le domaine 4D paraît important dans ses accomplissements futurs.

Le présent ouvrage présente plusieurs aspects. Il peut d'abord se lire comme un livre de science classique qui explique l'état de l'art et dit tout ce qu'il faut savoir et tout ce qui se fait en impression 4D. Ensuite, il parcourt l'ensemble des problèmes qui se posent aux concepteurs d'artefacts dans le domaine : problèmes mécaniques, problèmes de matériaux, choix des applications et problèmes industriels. Enfin, ce livre peut se lire comme un roman d'aventures. En effet, il suit pas à pas l'aventure de la recherche, les difficultés, les obstacles et les facilitateurs (voire les empêcheurs de penser droit) que les chercheurs rencontrent sur leur route. Il incite à la réflexion sur la créativité en recherche et sur le rôle des innovations de rupture. Le suivi historique des inventions éclaire le lecteur sur les voies (parfois impénétrables !) et les méthodes de la recherche, ce qui débouche sur une profonde réflexion épistémologique sur la

recherche et l'innovation dans un contexte de révolutions technologiques successives depuis plusieurs siècles.

En particulier, nos auteurs éclairent, de manière très originale, les notions de rupture, ou de « disruption » pour utiliser un terme à la mode. L'impression 3D et maintenant 4D sont-elles des ruptures ou l'utilisation intelligente de techniques connues ? La 3D finira-t-elle par s'imposer dans la plupart des fabrications, ouvrant ainsi la voie à un usage fréquent de la 4D ? Ce sont quelques questions qui sont posées par l'industrialisation de la fabrication additive et ses multiples applications.

Par ailleurs les auteurs n'évident aucune question concernant l'impact et l'acceptation sociale des nouvelles technologies et de leurs applications. L'ensemble des applications industrielles d'ores et déjà envisageables est décrit, tout en se gardant de considérer que l'histoire est finie (en fait, elle commence à peine) et que par conséquent le processus créatif à l'œuvre dans la recherche sur la 4D ne nous réservera plus de surprises.

Ceux qui ont lu les livres de Jean-Claude André sur la 3D connaissent sa gigantesque érudition, dont il nous fait à nouveau profiter en émaillant le livre de très nombreuses citations, souvent savoureuses, toujours très instructives et inspirantes. Le tout est accompagné d'une bibliographie extrêmement large et très utile pour les étudiants comme pour les chercheurs.

En se plongeant dans le livre Frédéric Demoly et Jean-Claude André, le lecteur va non seulement apprendre tout ce qu'il faut savoir sur la 4D, état de l'art, matériaux, applications, évolutions et problèmes, mais il va également comprendre comment progresse la recherche entre développement incrémental, créativité et rupture. C'est tout un monde, foisonnant de réflexions sur la science et son épistémologie en relation avec la créativité et l'innovation, qui est dévoilé aux lecteurs par deux grands chercheurs, pionniers de la fabrication additive dans toutes ses dimensions.

Jean-Charles POMEROL
Président de l'incubateur Agoranov
et du conseil scientifique d'ISTE Editions

Avant-propos

« Il n'existe aucun accommodement durable entre ceux qui cherchent, pèsent, dissèquent, et s'honorent d'être capables de penser demain autrement qu'aujourd'hui, et ceux qui croient ou affirment croire, et obligent sous peine de mort leurs semblables à en faire autant. » (Yourcenar 1968)

« La culture [...] est constituée par l'ensemble des valeurs, des représentations, des idées, des connaissances, des mythes qui permettent de penser et d'agir. Pour penser et agir, il faut établir des points de repère, se construire un système de référence, se fabriquer un petit univers en somme, nous permettant de nous situer dans le temps et dans l'espace. » (Lesgards 1994)

« Il est un autre caractère de permanence dans le temps que celui du caractère. C'est celui de la parole tenue dans la fidélité de la parole donnée. Je vois dans cette tenue la figure emblématique d'une identité polairement opposée à celle du caractère. La parole tenue dit un maintien de soi qui ne se laisse pas inscrire, comme le caractère, dans la dimension du quelque chose en général, mais uniquement dans celle du *qui* ?. Ici aussi l'usage des mots est un bon guide. Une chose est la persévération du caractère ; une autre la persévérance de la fidélité de la parole donnée. Une chose est la continuation du caractère ; une autre, la constance dans l'amitié. » (Ricœur 1990)

« Ce que nous appelons d'ordinaire "amis" et "amitiés", ce ne sont que des relations et des fréquentations nouées à la faveur de quelque circonstance ou par intérêt, qui font que nos cœurs s'entretiennent. Mais dans l'amitié dont je parle, ils se mêlent et se confondent l'un et l'autre, dans une unité si parfaite qu'ils effacent et ne retrouvent plus la liaison

qui les a unis [...]. Je sens que cela ne peut s'exprimer, sinon en répondant : "Parce que c'était lui, parce que c'était moi." » (Montaigne 1995)

Avertissement

L'impression 3D permet, par des voies numériques, de créer des objets aux formes très complexes à partir de matériaux passifs (polymères, céramiques, verres, métaux, alliages, etc.) en additionnant des éléments de matière ou des matériaux pour réaliser l'objet désiré, avec la précision désirée. La nouvelle idée (qui viendrait de l'université de Bath en Angleterre en 2012 ou du MIT en 2013) est d'ajouter au bon endroit une fonctionnalité aux matériaux (appelés actifs, stimulés, informés, intelligents, *smart*), qui peuvent ainsi voir leur forme ou leur fonctionnalité changer dans le temps sous l'effet d'une stimulation externe. Il a fallu environ 25 ans pour que la fabrication additive 3D développe un marché industriel (environ 30 milliards d'euros par an actuellement). Aujourd'hui, l'impression 4D ne représente qu'un marché modeste d'environ 100 millions d'euros par an, mais avec un taux annuel de publications/marché en augmentation de 40 % par an. Cependant, malgré de nombreuses promesses, nous sommes encore loin de *Terminator 2* avec une stimulation globale (et pas toujours facilement localisée) et des matériaux sans doute encore trop mous et avec des temps de réponse trop longs, mais cela fonctionne et c'est spectaculaire. Ce que nous cherchons aujourd'hui (avec de nombreux autres collègues), c'est à briser les verrous présentés dans cet ouvrage (pour en trouver d'autres ?).

Mais, même s'ils répondent au sujet de ce livre écrit à quatre mains, les problèmes à résoudre sont (trop) nombreux (au moins pour les deux auteurs). Alors, si vous avez déjà acheté cet ouvrage, cet avertissement peut vous suffire. D'ailleurs, Pierre Bayard (2007) pourra vous aider à avoir un échange passionnant à propos d'un livre non lu avec une personne qui, parfois, pourrait ne pas l'avoir lu non plus ! Si vous avez un tout petit peu plus de temps à nous accorder, l'introduction vous donnera déjà une meilleure idée des différents verrous à faire sauter, et ils sont nombreux. Dire que l'on ajoute un paramètre, le temps, aux trois d'espace cache en fait de nombreux critères ou paramètres avec lesquels on peut « jouer » pour échouer ou réussir dans une démarche difficile nécessitant quelques idées divergentes, suivies de nombreuses mutualisations interdisciplinaires dont chacun connaît la difficulté.

Et puis nous avons « pollué » ce document de dits « érudits » qui rejettent le partage arbitraire entre les « cultivés ignorants » et les « savants incultes » (Serres 1991), parce qu'en accord avec Darbelay (2020), nous ne voulons pas maintenir dans des silos bien étanches les sciences dites dures et les humanités (d'ailleurs, c'est peut-être plus facile de pratiquer l'interdisciplinarité entre domaines scientifiques réellement joints). Nous avons donc introduit quelques citations dans le texte, citations qui se présentent souvent comme des éléments de nos réflexions et qui, comme Darbelay l'écrit,

« franchissent allègrement les frontières posées encore souvent aujourd’hui entre les cultures littéraires et scientifiques ».

Pour notre part, si nous voulions avancer sur ce sujet spectaculaire qu’est l’impression 4D avec quelques regards épistémologiques indispensables, il nous fallait sortir en partie d’une littérature scientifique convenue, positive, gardant des racines scientifiques solides issues des « bons » auteurs récents, mais déjà considérés comme des classiques ou des références du domaine (qui n’est pas encore une discipline). En ayant connu depuis 1984 l’histoire de la technologie source, la fabrication additive, il a été également possible de la relier à ce domaine émergent (2013), en suivant les progrès des sciences et des technologies 4D, menés dans un cadre organisationnel relativement stable (avant la pandémie associée au coronavirus).

D’un point de vue épistémologique, apparaît, comme le propose Némo (2020), le besoin d’estimer l’importance de l’accumulation de connaissances scientifiques issues d’horizons différents dans une aventure technologique où la stabilisation de certains concepts est encore à faire, avant d’arriver à leur convergence pour réaliser des dispositifs technologiques d’utilisation courante. En quoi le fait de lire nombre d’articles, d’en restituer des connaissances singulières, généralement disciplinaires et non intégrées dans une logique paradigmatique robuste, va-t-il aider le lecteur dans sa quête d’un récit cohérent et possiblement pratique ? Némo (2020) écrit : « Si l’ambition du philosophe est “synoptique”, il doit pouvoir étendre son regard sur tout le réel, tel que l’humanité le connaît. » Les connaissances sont dispersées, ont des origines disciplinaires multiples et progressent vite. Il y a donc besoin de disposer de connaissances actuelles, le moins filtrées possible, pour « construire les notions et abstractions pertinentes pour le temps présent ». Mais, on l’aura compris, il s’agit d’une opération sur un objet conceptuel encore en construction. Elle vise à réduire la fragmentation d’un monde spécialisé de la fabrication numérique en créant, autant que faire se peut, un peu de sens commun, qui pourra servir à l’action collective. Mais, tant que certaines idées reçues, certaines habitudes émergées depuis 2013 persisteront, l’impression 4D pourra difficilement être en mesure d’interroger, d’explicitier et de mieux prendre en compte les déterminants socio-économiques associés à ses objets, ses pratiques, ses potentialités, ainsi qu’à ses finalités, présentes et futures. Pour les auteurs, ce livre ne passe pas par un refus de l’octroi de monopoles auto-attribués à certaines disciplines et façons de penser, c’est tout le contraire pour autant que le jeu en vaille la peine... Ils souhaitent juste exploiter toute la richesse possible pour un domaine auquel ils croient.

Enfin, avec l’humilité nécessaire parce que nous n’en sommes qu’au début d’une possible grande aventure scientifique et technologique, nous tenterons de vous montrer ce que l’existant permet d’évoquer, quelles voies nous paraissent jouables, celles qui sont possibles, mais non explorées, ou celles qui n’ont probablement qu’un futur modeste. En nous posant un peu en censeurs, nous savons que nous prenons des risques

de nous tromper, de ne pas satisfaire nombre de nos chers collègues prenant leurs pleines dimensions dans un conformisme plus facilement publiable, etc. Il s'agit de s'engager dans une forme d'apprentissage collectif avec toutes les composantes disciplinaires ou interdisciplinaires, avec de nouvelles connaissances de compréhension et d'action, capables de faire sens pour des décisions porteuses de futur. Nous prenons ce risque parce que nous croyons en un futur très positif de cette technologie ouverte, qui pourrait ne pas être générique comme sa discipline mère, la fabrication additive. Mais, avec cette croissance exponentielle, sait-on jamais, il doit exister des publications qui sortent des conformismes élevés au rang d'éthique par des pairs disciplinaires, publications que l'on aurait pu rater dans nos analyses bibliographiques (qui doublent en nombre tous les 17 mois)... Alors, vous aurez le droit de critiquer ce livre.

Dans ces conditions, si vous pensez que nous nous trompons, si vous avez de belles idées, n'hésitez pas à nous contacter¹. Et, c'est promis, si l'on doit protéger votre idée ou faire une publication, vous serez au minimum associé au travail de validation (preuve de concept), mais vous pouvez sans problème le faire sans nous... Pour revenir à Pierre Bayard, nous cautionnons son écrit (issu de son livre qui a été lu !) : « Quel plus beau présent peut-on faire à un étudiant que de le sensibiliser aux arts de l'invention, c'est-à-dire à l'invention de soi ? »

Un ouvrage en deux volumes

L'Homme, il y a bien longtemps, a cherché à utiliser les matériaux qu'il avait sous la main pour réaliser des outils, des armes, etc. Pour ce faire, en dehors des opportunités associées à ces matériaux, il a été amené à disposer d'informations sur leurs propriétés mécaniques, sur leur disponibilité, leur fatigue et naturellement sur leur mise en forme pour atteindre une fonctionnalité désirée. Cette situation millénaire reste toujours d'actualité avec des progrès dans tous ces domaines.

En 1984 émerge une technologie de mise en forme, l'impression 3D, ou fabrication additive, qui utilise différents types de matériaux (et plusieurs technologies) pour réaliser de manière déterministe, en s'appuyant sur les sciences du numérique, des objets complexes. Mais c'est vers 2013 que l'on propose d'utiliser une ou des matières actives grâce à des stimuli énergétiques, qui autorisent à la fois de donner forme à cet objet, mais également des évolutions de fonctionnalité : mouvement, changement des propriétés de surface, de couleur, etc. De fait, à l'exploration des trois paramètres d'espace couverts par la fabrication additive, on ajoute un nouveau degré de liberté : le temps.

1. frederic.demoly@utbm.fr et jean-claude.andre@univ-lorraine.fr.

Depuis cette date, le domaine se développe très rapidement à cause de promesses évidentes permises par ces libertés d'action. L'analyse faite dans cet ouvrage indique un taux de croissance de 44 % par an, qui est beaucoup plus important que celui de la seule impression 3D, qui n'est que d'un peu moins de 20 % !

Pour cette raison, alors que nous nous étions engagés à ne proposer à l'éditeur qu'un seul volume au départ, devant l'avalanche des résultats nouveaux, nous avons été amenés à proposer un document plus vaste, tenant compte (provisoirement) de la situation scientifique du moment. Ainsi, deux volumes sur le thème sont proposés :

- volume 1 : « entre recherche disruptive et applications industrielles » ;
- volume 2 : « entre science et technologie ».

Le premier volume concerne les fondements de cette technologie récente et, comme il s'agit d'une technologie qui se doit de trouver des applications pratiques, une analyse de ce potentiel a été réalisée pour tenter de cerner des possibilités de hiérarchisation d'actions scientifiques et technologiques. Le second, finalement plus classique, concerne l'état de l'art actuel avec des ouvertures sur la conception d'objets complexes.

En vous souhaitant une lecture intéressée de ces deux volumes.

« La question de savoir comment une idée nouvelle peut naître dans l'esprit d'un Homme [...] peut être d'un grand intérêt pour la psychologie empirique, mais elle ne relève pas d'une analyse logique de la connaissance scientifique. Cette dernière se trouve concernée non pas par des questions de fait, mais seulement par des questions de justification ou de validité. » (Popper 1978)

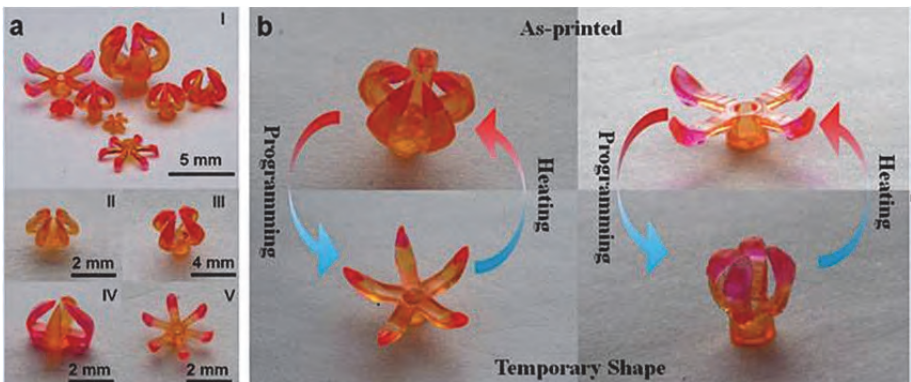


Figure 1. Mise en évidence d'un effet 4D (fermeture réversible par effet thermique selon (Ge et al. 2016))

Bibliographie

- André, J.C. (2017a). *De la fabrication additive à l'impression 3D/4D 1 : des concepts aux réalisations actuelles*. ISTE Editions, London.
- André, J.C. (2017b). *De la fabrication additive à l'impression 3D/4D 2 : améliorations des techniques actuelles et leurs limites*. ISTE Editions, London.
- André, J.C. (2017c). *De la fabrication additive à l'impression 3D/4D 3 : innovations de rupture*. ISTE Editions, London.
- Bayard, P. (2007). *Comment parler des livres que l'on n'a pas lus ?* Editions de Minuit, Paris.
- Darbelay, F. (2020). L'érudition : faire du neuf avec du vieux ? Interdisciplinarité, polymathie, indiscipline. *Hermès – La Revue*, 87, 205–212.
- Ge, Q., Sakhaei, A.H., Lee, H., Dunn, C.K., Fang, N.X., Dunn, M.L. (2016). Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. *Scientific Reports*, 6, 31110.
- Lesgards, R. (1994). Savoir et vision dialogués. In *Sciences et imaginaires*, Maréchal, I.A. (ed.). Albin Michel, Paris.
- de Montaigne, M. (1995). *Essais*. PUF, Paris.
- Némo, P. (2020). Philosophie et connaissances “érudites”. *Hermès – La Revue*, 87, 68–75.
- Popper, K. (1978). *La logique de la découverte scientifique*. Payot, Paris.
- Ricœur, P. (1990). *L'ordre philosophique*. Le Seuil, Paris.
- Serres, M. (1991). *Le Tiers-Instruit*. François Bourin, Paris.
- Yourcenar, M. (1968). *L'œuvre au noir*. NRF, Paris.