

L'impression alimentaire : de la 3D à la 6D !

On entend parler d'impression 6D, notamment alimentaire, après les impressions 3D, 4D, 5D : comment tout cela est-il possible, alors que les formes n'ont que trois dimensions spatiales ? C'est ce que nous examinerons après avoir considéré les évolutions d'un domaine technologique très actif, où les questions techniques restent nombreuses, mais dont l'intérêt économique semble clair.

Du plan au volume

La reproduction d'aliments a suivi un mouvement comparable à la reproduction de textes, pour laquelle la copie, jadis à la main, a été facilitée par l'impression, avec notamment les avancées de Johannes Gutenberg, au ^{xv}^e siècle ; puis, plus tard, pour des reproductions personnelles, la ronéotypie et ses cousins ont été supplantés par nos imprimantes modernes pilotées par ordinateur. L'impression par jet d'encre fut un spectaculaire progrès et, avec plusieurs passages, l'impression en couleur est devenue possible, mais, surtout, on a appris à déposer des couches successives... et c'est ainsi qu'est apparue la fabrication additive, encore nommée impression en trois dimensions (3D).

Les premiers systèmes, initialement coûteux (plus de 150 000 \$) mais devenus parfois très bon marché (de l'ordre de 200 €) sont d'un principe très simple : pour beaucoup d'entre eux, une tête munie d'une buse se déplace et dépose à volonté un fluide plus ou moins visqueux, ce qui engendre une forme plus ou moins bien définie. Le système de base peut être amélioré : par exemple, il existe des systèmes avec une tête munie d'un laser ou d'une source d'air chaud, pour fondre des couches de poudre déposées successivement, afin de former des objets tridimensionnels (techniques de *selective hot air sintering and melting*, SHASAM, ou de *selective laser sintering*, SLS, utilisées sur du sucre par exemple, technique de *fused deposition modeling*, de *color jet printing*, etc.).

Veut-on solidifier l'objet déposé ? Le refroidissement suffit parfois, notamment en cas de gélification du matériau déposé, mais on peut aussi ajouter des gélifiants à une préparation, ou cuire l'objet déposé, soit une fois terminé, soit lors du dépôt, notamment à l'aide d'un petit laser ou d'air chaud disposé à côté de la buse et dirigé vers le site de dépôt.

Initialement, de tels systèmes ont été utilisés pour des matériaux polymères, mais, en 2006, des étudiants de l'Université Cornell les ont utilisés pour du chocolat. Puis, rapidement, l'industrie alimentaire s'y est intéressée, et l'on a vu apparaître les premières imprimantes 3D alimentaires, que les fabricants ont popularisées en les confiant à des cuisiniers étoilés. Et c'est ainsi que des cuisiniers ou des pâtisseries ont commencé à imprimer des plats devant les clients à Londres, aux Pays-Bas ou sur la côte Est des États-Unis. Des imprimantes à poudre et solidification par air chaud (SHASAM) ont notamment permis d'élaborer de très gros objets en sucre [1], tandis que des systèmes nommés *Chefjet* et *Chefjet Pro* étaient mis au point à l'attention des cuisiniers et des boulangers.

La production des premiers aliments imprimés était lente (jusqu'à 45 minutes), mais on avait le sentiment que l'on saurait progressivement accélérer les dépôts, notamment par la mise en parallèle de plusieurs têtes d'impression. En outre, l'utilisation de plusieurs buses permettait d'imprimer différents matériaux : par exemple, pour la reproduction de filets de saumon avec des protéines végétales ; certains parvinrent même à donner l'illusion des parties roses et des parties blanches de poisson, avec des reproductions des fibres roses et des zones collagéniques et grasses blanches [2]. Au fait, pourquoi vouloir faire du faux saumon ?

Quels matériaux déposer ?

Les techniques additives permettent de déposer des matériaux solides ou semi-solides pour former des couches superposées selon un modèle pré-établi. Initialement on a utilisé du chocolat, des pâtes à base de divers féculents, des suspensions végétales, du sucre [1], etc. On n'avait pas obtenu de dépôts à partir de suspensions d'origine animale (viande hachée) sauf en ajoutant des additifs bien choisis, mais des études sur des pâtes de surimi de crevettes ont montré comment l'ajout d'amidons modifiés, d'isolats de protéines de poisson ou de graisses animales peut résoudre la question [3]. Chaque système a ses propres contraintes, en termes de matériaux à déposer. Par exemple, la viscosité des pâtes déposées par extrusion, à l'aide d'une buse et d'une éjection à pression constante, doit être adaptée à la puissance des systèmes d'extrusion. D'autre part, les techniques de type jet d'encre délivrent un courant de gouttelettes à partir d'une tête chauffée pour décorer des surfaces, telles celles de gâteaux ou d'autres systèmes alimentaires. Ces systèmes sont souvent équipés de têtes thermiques ou piézoélectriques : un chauffage électrique de la tête engendre des impulsions de pression qui poussent les gouttelettes, soit en continu, soit goutte à goutte. Pour le jet continu, un cristal piézoélectrique éjecte un jet continu en raison d'une vibration à fréquence constante, mais des composés doivent être ajoutés à l'encre pour la rendre conductrice. Les systèmes goutte à goutte ont un débit souvent inférieur, mais une meilleure résolution de dépôt. Dans les deux cas, la viscosité de l'encre est limitée, et ces systèmes permettent ainsi de déposer du chocolat, une pâte liquide, un nappage, une pâte de viande, du fromage, de la confiture, des solutions qui peuvent ensuite gélifier, etc. Pour les systèmes à éjection de liant, on construit les modèles en utilisant un liant que l'on ajoute à des couches de poudres. Des petites gouttes de liant (diamètre inférieur à 100 µm) sont déposées sur la surface de la poudre ; puis la surface du lit de poudre est chauffée, par exemple avec une lampe à infrarouges, afin de solidariser la couche. La création des objets se fait ainsi couche après couche.

Avec ces diverses techniques, les matériaux employés sont souvent des poudres, des pâtes, des matériaux fondus à température ambiante. L'amidon, les fibres végétales, les solutions de protéines ou le chocolat ont été les principaux

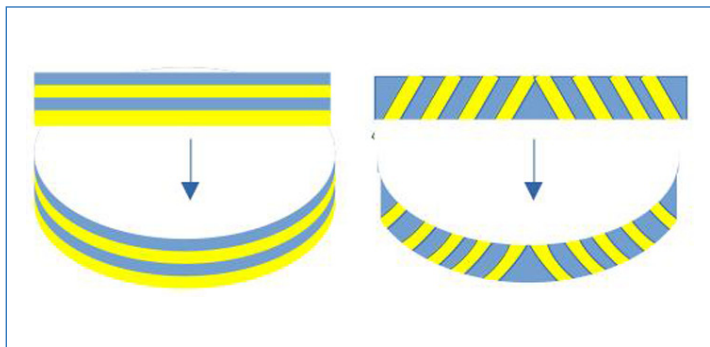


Figure 1 - Avec le même stimulus thermique, on peut obtenir une déformation d'une structure imprimée 6D (à droite) supérieure à celle d'une structure 4D (à gauche) [15].

matériaux explorés. Reste que les propriétés d'extrudabilité sont difficiles à prévoir quand on change simultanément les proportions d'amidon, de protéines, de lipides, par exemple. Une optimisation de l'ajout des ingrédients au mélange à extruder s'impose pour obtenir des suspensions susceptibles d'être injectées dans des imprimantes 3D. Des travaux visent à trouver des modèles mathématiques pour déterminer les propriétés des matériaux utilisables.

En toute généralité, les matériaux d'impression doivent permettre des débits réguliers, tout en ne coulant pas après le dépôt. Les ingrédients alimentaires classiques (laitages, légumes, fruits, etc.) ne conviennent généralement pas pour le dépôt additif, mais ils peuvent être réduits en liquides ou en suspensions qui sont ensuite modifiés, notamment par l'ajout de divers polysaccharides hydrophiles, de diverses origines : végétale (amidon, carraghénanes, alginates, agar-agar), animale (gélatine, chitosanes), microbienne (gommes xanthane ou gellanes).

L'amidon est une matière particulièrement intéressante, en raison de son abondance mais, aussi, de ses propriétés rhéologiques. Il est composé de polymères linéaires (amyloses) ou ramifiés (amylopectines) du D-glucose. Pour l'utiliser dans des imprimantes 3D, on a testé des modifications chimiques des polymères natifs, notamment en fonctionnalisant (estérification, éthérisation, oxydation, réticulation) les trois groupes hydroxyles en C2, C3 et C6. Les amidons modifiés obtenus sont bon marché, et il a été montré que les gels d'amidon avec une plus grande proportion de petites amylopectines (par exemple, blé ou maïs) sont mieux adaptés à l'extrusion 3D [4] ; avec des chaînes plus longues (par exemple, pommes de terre), les gels sont plus durs. L'amylopectine peut former des particules, des nanoparticules, des micelles, des films et des hydrogels. La teneur en amylose est positivement corrélée à la contractibilité des pâtes, leur viscosité, la température de gélification. L'extrusion effectuée lors du dépôt réduit la cristallinité des amidons, faisant perdre l'organisation moléculaire et engendrant des dépôts amorphes qui peuvent se recristalliser lors du refroidissement ou du stockage. Avec des dépôts à seulement 40 °C, la gélification de l'amidon est partielle, ce qui nuit à la régularité des dépôts. L'utilisation de stérilisation sous forte pression change la structure de l'amidon et favorise la stabilité des dépôts.

Et on terminera ce paragraphe en signalant que l'impression 3D est le meilleur atout de la « cuisine de synthèse » (ou « note à note »), pour laquelle on n'utilise plus des tissus végétaux ou animaux, mais des composés correspondant aux diverses « dimensions » de l'aliment : consistance, couleur, saveur, odeur, etc. [5].

Au-delà de 3D

Au-delà de l'impression 3D, l'impression 4D se développe comme une technique dont les potentialités sont supérieures, pour la réalisation de produits de formes complexes [6-8]. Elle fut initialement proposée en 2013 par Tibbitts [9] : il s'agit d'imprimer des objets à l'aide de matériaux susceptibles de réagir à des stimuli tels que température, pH, teneur en eau, UV, lumière, etc., de sorte que l'on engendre des modifications des objets au cours du temps (la quatrième dimension). Les dépôts sont souvent multi-couches, avec des couches de différentes natures, et les modifications peuvent être de forme, de couleur, ou de goût, par exemple.

Initialement les explorations des changements de forme concernaient surtout des matériaux non comestibles, tels qu'hydrogels, polymères à mémoire de forme, alliages, céramiques, mais dès 2012, des équipes de l'INRA étudiaient des amidons à mémoire de forme, et de tels matériaux sont aujourd'hui utilisés pour des impressions alimentaires : films de pâte incorporant des mélanges de gélatine et d'éthylcellulose, pâtes à base de farine qui changent de forme à la cuisson au four ou dans de l'eau. Notamment ont été ainsi produits des tacos qui se replient spontanément ou des nouilles qui s'assemblent, réduisant le volume des conditionnements.

Pour les changements de couleur, Ghazal et son équipe ont étudié des assemblages de deux gels 3D : un gel fait d'amidon de pomme de terre associé à des anthocyanes, disposé au-dessus d'un gel de jus de citron. Le gel supérieur passe du pourpre au rouge quand le produit 3D est aspergé d'une solution de pH contrôlé, mais il change également de couleur en raison de la diffusion des acides présents (citrique, malique, ascorbique) dans le jus de citron. Des gradients de couleurs ont également été obtenus par des systèmes multi-couches [10, 11].

Enfin, des techniques additives ont été employées pour des changements de goût. Des solutions à différents pH ont été utilisées pour changer le goût de produits qui contenaient des

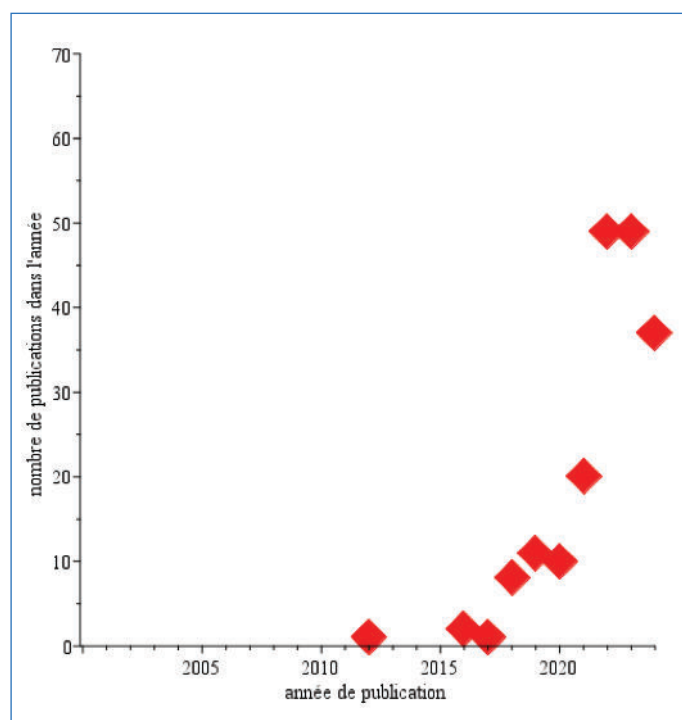


Figure 2 - Le nombre de publications correspondant aux mots-clés « 3D food printing » est en rapide augmentation (données PubMed, consulté le 22/08/24).



Figure 3 - Un biscuit de dessert imprimé à la Technological University de Dublin par K. Gill, A. Lopez Gonzalez, M. O'Brien and C. Scanlon © Roisin Burke.

isolats protéiques de pois, de la poudre de betterave et de la poudre de potiron [12]. À l'aide de nez électroniques, il a été établi que les libérations de composés odorants (notamment des esters terpéniques) changeaient, aux pH de 8 et 10 ; en revanche, le goût changeait peu à l'intérieur des produits. Enfin des études de modifications nutritionnelles ont également été conduites : libération de micro-nutriments (curcumine), production de vitamines (par exemple, la vitamine B12).

Toutefois l'utilisation d'imprimantes 3D a des limites et, notamment, il est difficile de produire des surfaces incurvées afin d'augmenter la résistance des pièces imprimées. À ce jour, les dépôts restent lents. La technique 5D, introduite en 2016 par les Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL), permet de produire plus rapidement des objets selon cinq axes au lieu de trois (X, Y, Z), grâce à l'ajout de deux axes de rotation, ce qui permet d'obtenir des surfaces incurvées [13]. Et l'impression 6D, introduite par Georgantinos et ses collaborateurs, résulte du mélange des impression 4D et 5D [14]. La possibilité d'incliner la tête conduit à des possibilités supérieures, et, notamment, on espère des dépôts plus rapides et plus efficaces (figure 1). Le développement des études est en effet exponentiel (figure 2).

[1] The CandyFab Project, 2007, <https://candyfab.org/>

[2] Revo Foods: From the idea of plant-based, 3D-printed seafood to an investment of almost 2 Mio €, EIT, 2021, www.eitmanufacturing.eu/news-events/news/revo-foods-from-the-idea-of-plant-based-3d-printed-seafood-to-an-investment-of-almost-2-mio-euro/

[3] Y. Pan *et al.*, Optimization of 3D printing formulation of shrimp surimi based on response surface method, *LWT, Food Science and Technology*, 2024, 199, 116126.

[4] S. Ji *et al.*, Effect of starch molecular structure on precision and texture properties of 3D printed products, *Food Hydrocolloids*, 2022, 125, 107387.

[5] H. This, La cuisine note à note en 12 questions souriantes, Belin, 2012.

[6] F. Momeni *et al.*, A review of 4D printing, *Materials & Design*, 2017, 122, p. 42-79.

[7] S. Ramesh *et al.*, Advancements in the research of 4D printing-A review. IOP Conference Series, *Mat. Sc. Eng.*, 2018, 376, 012123.

[8] N. Wang, R. Li, X. Wang, X. Yang, 4D food printing: Key factors and optimization strategies trends, *Food Sc. Tech.*, 2024, 145, 104380.

[9] S. Tibbits, The emergence of "4D printing", TED Conference, 2013.

[10] A.F. Ghazal *et al.*, Spontaneous color change of 3D printed healthy food product over time after printing as a novel application for 4D food printing, *Food and Bioprocess Tech.*, 2019, 12, p. 1627-45.

[11] A.F. Ghazal, M. Zhang, A.S. Mujumdar, M. Ghamry, Progress in 4D/5D/6D printing of foods: applications and R&D opportunities, *Critical Reviews, Food Science and Nutrition*, 2023, 63(25), p. 7399-7422.

[12] P. Phuhongsung *et al.*, 4D printing of products based on soy protein isolate via microwave heating for flavor development, *Food Research Int.*, 2020, 137, 109605.

[13] M. Molitch-Hou, 3D Printing + Five Axes = 5D Printing?, 2016, www.engineering.com/3d-printing-five-axes-5d-printing

[14] S.K. Georgantinos, G.I. Giannopoulos, P.A. Bakalis, Additive manufacturing for effective smart structures: the Idea of 6D printing, *J. Compos. Sci.*, 2021, 5(5), 119.

[15] P.R. Reddy, P.A. Devi, Review on the advancements to additive manufacturing-4D and 5D printing, *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, 2018, 8, p. 397-402.

Hervé THIS^{1*}, physico-chimiste, Charlotte DUMOULIN², doctorante, et Roisin BURKE³, professeur.

¹International Centre of Molecular and Physical Gastronomy, Inrae-AgroParisTech, Palaiseau.

²SayFood, UMR INRAE-AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Palaiseau.

³Technological University, Dublin (Irlande).

* herve.this@agroparistech.fr