

Vers la conception d'aliments à fonctionnalités ciblées et de bioproducts par impression 3D

Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing

Stéphane Portanguen¹, Pascal Tournayre¹, Jason Sicard¹, Thierry Astruc¹,
Pierre-Sylvain Mirade¹

¹ INRA, UR 370 QuaPA (France), 63122 Saint-Genès-Champanelle, France, stephane.portanguen@inra.fr, pascal.tournayre@inra.fr, jason.sicard@inra.fr, thierry.astruc@inra.fr, pierre-sylvain.mirade@inra.fr

RÉSUMÉ. L'impression 3D offre désormais une énorme liberté de conception, de fabrication et d'innovation dans un grand nombre de domaines industriels, dont le médical et l'alimentaire. Nous analysons, ici, les récents développements dans ces deux domaines, ainsi que l'impact de ces méthodes 3D en termes de développement durable et d'acceptabilité des consommateurs. Une réflexion est également amorcée concernant les aliments à fonctionnalités ciblées imprimés en 3D, ciblant différents secteurs de la population, ainsi que les perspectives de développement de ces produits au cours de la prochaine décennie. L'impression 3D est une technologie prometteuse et, offrir des solutions nutritionnelles clé en main et sur mesure à des populations jusqu'alors exclues de certains marchés en raison de leur état de santé, de difficultés d'accès aux ressources alimentaires, ou tout simplement avec un pouvoir d'achat limité, représente une série de problèmes à surmonter. Le défi majeur pour les années à venir sera de développer, en utilisant l'impression 3D, des produits carnés ou des produits mélangeant des sources de protéines alternatives parfaitement structurés sans devoir utiliser d'additifs. La dernière étape consistera à obtenir l'approbation du consommateur pour ces aliments imprimés en 3D.

ABSTRACT. 3D printing now provides enormous freedom to design, manufacture and innovate in a whole number of sector spaces, including medical and food sectors. Here, we analyze the applications developed on the back of these methods, targeting the impact these methods have on the design and production-line sustainability of the biobased products per se and on consumer acceptability of these 3D-printed products. We also look at 3D-printed functional foods targeting different sectors of the population, and the development prospects for 3D-printed biobased products in the coming decade. 3D printing is a technology with a bright future. Providing custom-tailored turnkey nutritional solutions to populations that have thus far been excluded from certain markets due to their health conditions, deprived of regular access to food resources, or simply too short of buying power, represents a series of issues that can be overcome. The major challenge for the coming years will be to develop, using 3D printing, meat products or products blending alternative protein sources that remain perfectly structured without having to use additives. The final step will be to garner consumer acceptance for these 3D-printed foods.

MOTS-CLÉS. Fabrication additive, coproduits, protéines, personnalisation, développement durable, acceptabilité des consommateurs.

KEYWORDS. Additive manufacturing, by-products, protein, personalization, sustainable development, consumer acceptability.

1. Introduction

Le développement des méthodes de fabrication additive (FA), plus communément appelées “impression 3D”, offre, ces dernières années, de nombreuses possibilités de conception, de fabrication ou d'innovation dans des domaines aussi variés que la mécanique [CHE 17], l'aéronautique [FOR 16], le design [LAN 17], le biomédical [SIN 17], l'industrie pharmaceutique [ICT 17], les biotechnologies [KRU 17] ou l'alimentation [PIN 17]. La littérature liée à ces techniques s'enrichit chaque jour, et de nombreux auteurs parlent même d'une nouvelle révolution industrielle au vu des potentialités immenses de la FA [GRO 14] ; [ATT 17]. Cet article a pour vocation de faire un état de l'art sur les applications de la FA au niveau des biomatériaux dans le domaine biomédical, et en particulier dans le domaine alimentaire.

2. Développement de bioproduits par fabrication additive

2.1. Dans le domaine médical

Dans ce domaine, [BOS 18] distinguent deux catégories de méthodes d'impression de biomatériaux : 1) abiotique (céramiques, hydrogels) et 2) biotique. La seconde catégorie permet l'impression de cellules vivantes qui, ensuite, se multiplieront après une phase d'incubation afin de former un tissu. Pour [KRU 17], la bio-fabrication et la bio-impression sont deux domaines étroitement liés qui se réfèrent, à la fois, à des procédés dédiés aux cellules vivantes et aux différents biomatériaux. Pour ce faire, les méthodes suivantes peuvent être utilisées : impression jet d'encre, impression par extrusion et impression assistée par laser. Les principales applications en biomédical correspondent à l'impression de tissus [CHI 15] : os, organes, vaisseaux sanguins, nerfs.... [ALM 17] ont démontré qu'il était possible de fabriquer, par impression 3D, une microstructure calcique proche de celle des os humains. Cette étude offre des perspectives intéressantes dans le domaine des greffes. Mais, malgré les possibilités de ces techniques pour construire ou régénérer des tissus *in situ*, de nombreux défis subsistent, comme indiqué par [GUD 16], notamment pour la technique de bio-impression par gouttelettes. Outre les problèmes éthiques ou réglementaires, des aspects techniques fondamentaux apparaissent, comme la gamme restreinte de biomatériaux disponibles, les lésions cellulaires induites par la bio-impression ou encore l'intégrité mécanique ou structurale des constructions réalisées. Ce dernier point a d'ailleurs des conséquences sur la vascularisation des organes imprimés, limitant de ce fait leur viabilité. Pour [JAK 10], un des points majeurs est de contrôler précisément l'environnement cellulaire, de façon à obtenir un bio-mimétisme permettant d'avoir les bonnes cellules au bon endroit, qu'elles soient fonctionnelles, et avec le bon phénotype. Ces auteurs soulignent également l'importance du *scaffold* (structure 3D servant de support topologique) lors de la fabrication de tissus ; en effet, ce dernier, conçu à partir de matériaux biodégradables, va permettre de définir les caractéristiques topologiques du tissu aux différentes échelles : nano, micro et macroscopique. Cependant, l'emploi de *scaffolds* biodégradables conduit à la formation de résidus de polymères qui peuvent nuire, par exemple, à l'organisation des parois vasculaires [JAK 10] ; confirmé par [GUD 16]. Plusieurs études [MEL 12] ; [NZ 14] ; [MUN 16] ; [WLO 17] ; [SHA 17] traitent de la mise en œuvre des *scaffolds* qui sont d'une importance cruciale pour fabriquer les tissus. Récemment, [WLO 17], dans leurs travaux portant sur des protéines structurales majeures comme le collagène, la soie ou la fibrine, affirment que la fabrication, par impression, de *scaffolds* poreux et interconnectés est simple. Il est d'ailleurs possible d'utiliser différents matériaux ou types cellulaires simultanément ou séquentiellement pendant le même processus. Une alternative aux *scaffolds* existe, ils peuvent être remplacés par des hydrogels. Ces structures ont l'avantage d'être biocompatibles [MEL 12], et de fournir un environnement adéquat aux cellules, en raison de leur forte teneur en eau et de leur faible teneur en polymères [WLO 17]. Même si des difficultés techniques perdurent quant à leur utilisation (propriétés rhéologiques, densité de réticulation...), des composés naturels (gélatine, acide hyaluronique...) peuvent être associés à des molécules de synthèse, comme la méthacrylamide, afin de favoriser la réticulation [MEL 12].

2.1. Dans le domaine alimentaire

D'après [GOD 16], les technologies de FA ont un grand potentiel pour fabriquer des aliments de géométrie complexe, de texture élaborée et de qualité nutritionnelle élevée. Mais, pour [LIU 17], peu d'études traitent de la précision nécessaire pour obtenir des aliments à structure maîtrisée par FA. En réalité, les difficultés majeures pour l'impression de nouveaux aliments résultent de plusieurs facteurs, comme les propriétés du matériau, les paramètres du processus d'impression et ceux du post-traitement (modes de cuisson, de conservation...). Même si certains auteurs évoquent, au final, la faible utilisation de la FA dans le domaine alimentaire [GAU 11], cité par [MAW 16], une tendance allant vers des applications culinaires en lien avec le "Food design", semble, tout de même, se dégager ces dernières années, avec plusieurs travaux récents traitant de ces applications [PAL 16]. Un projet Européen : PERFORMANCE - *Personalised Food Using Rapid Manufacturing for the Nutrition of Elderly Consumers* - [LIP 15] ; [LIU 17] avait même pour but, via l'impression 3D, de développer des aliments

attractifs destinés aux seniors. L'impression 3D peut donc être utilisée pour mettre en valeur certains aliments afin d'en augmenter l'attractivité auprès des consommateurs, ou plus simplement, pour créer de nouvelles structures ou formes à visée commerciale. Bien que l'aspect technologique soit intéressant - customisation des imprimantes, open source, programmation... - et que l'aspect sociétal soit important - attractivité de certaines populations vis-à-vis de la nourriture -, nous pouvons légitimement nous interroger sur la réelle portée scientifique d'études ne se limitant qu'au design d'aliments. Par exemple, [ZHA 18] ont investigué les potentialités de la programmation avec l'objectif d'obtenir un produit alimentaire personnalisé sur lequel un visage pourrait être imprimé à partir d'une photographie.

Dans ce contexte, un des aliments préférentiellement étudié est le chocolat [LIU 17]; [ZEL 17]; [LAN 17]. Dans leur review, [GOD 16] ont montré que des structures complexes en chocolat ou en sucre pouvaient être créées, à condition de maîtriser un certain nombre de paramètres, comme la température du réservoir et du système d'extrusion, la géométrie et la position de la buse par rapport au plateau, le comportement rhéologique... D'ailleurs, [MAN 17] ont mis en évidence que l'ajout de stéarate de magnésium dans le chocolat permettait d'obtenir un meilleur flux au cours du dépôt, et donc une meilleure "imprimabilité" du chocolat. Il existe également des études sur le sucre, ainsi que sur des purées à base de végétaux ou de viande. Le plus souvent, des additifs sont nécessaires afin de modifier les propriétés rhéologiques des produits comme, par exemple, la gomme de xanthane, l'agar-agar pour les végétaux ou bien la transglutaminase ou la gélatine pour les produits carnés [LIP 15]. Mais, comme actuellement, le consommateur a tendance à privilégier les produits *clean label*, contenant le moins d'additifs possible, la méthode consistant à incorporer des additifs dans des aliments n'en contenant préalablement pas pour s'adapter à un procédé ne nous semble pas être la bonne. Il faudrait plutôt concentrer les efforts au niveau du procédé lui-même de façon à l'adapter au produit que l'on souhaite imprimer. Ce même constat a été fait par [LIP 17] qui explique que pour l'instant, au niveau de la FA alimentaire, les travaux ont trait aux aspects esthétiques, sans se préoccuper de ceux liés à la santé du consommateur, qui ne devraient être réellement abordés qu'à plus long terme. C'est pourtant en utilisant les technologies de FA pour concevoir des aliments à composition nutritionnelle maîtrisée et/ou adaptée que les bénéfices vis-à-vis de la santé humaine pourraient être les plus importants. D'ailleurs, d'après cet auteur, il serait possible de définir les besoins énergétiques d'une personne, et d'imprimer directement un aliment en adéquation avec ses besoins. Mais, à notre connaissance, il n'existe aucune étude traitant réellement de la valeur nutritionnelle des produits imprimés, à l'exception, toutefois, des travaux très récents de [DER 18] portant sur l'activité antioxydante de snacks à base de fruits. Dans [LIP 15], le sujet de la fabrication de tissus entiers, pour l'alimentation humaine, a été abordé. L'idée serait de s'affranchir de l'élevage d'animaux pour produire des cellules musculaires et adipeuses. Nous pouvons alors imaginer que la valeur nutritionnelle de ces produits serait identique, ou, très proche d'une viande "classique". Les méthodes pour ce type de fabrication existent, elles sont proches de celles utilisées dans le domaine médical (*cf.* paragraphe 2.1). C'est d'ailleurs un des objectifs de la *start-up* américaine *Modern Meadow* qui travaille sur l'impression de cellules souches, dont le développement devrait permettre d'obtenir une matrice carnée proche de la viande. Mais, même si ces approches sont pour l'instant embryonnaires, nous pouvons tout de même déjà imaginer les difficultés futures: aspects économiques, caractéristiques nutritionnelles et organoleptiques, passage à l'échelle industrielle, apports en nutriments pour la culture cellulaire, sécurité sanitaire, problème éthique...

3. Impact des procédés de fabrication additive sur les macromolécules de l'aliment

Selon [TOH 18], pendant un procédé de FA, le produit est soumis à deux types de contraintes : 1) un traitement thermique correspondant à la fusion du produit et 2) un cisaillement lors de l'extrusion au travers de la buse. Le procédé va donc avoir un ou des effet(s) sur les macromolécules constituantes du produit alimentaire et modifier les propriétés de ce dernier. La plupart des études portant sur des applications de FA au niveau de molécules d'intérêt, sont réalisées sous l'aspect "imprimabilité";

l'imprimabilité d'un matériau se définissant comme l'ensemble des propriétés permettant à celui-ci d'avoir une stabilité dimensionnelle suffisante pour supporter son propre poids [GOD 16].

3.1. Impact sur les protéines

Relativement peu de produits riches en protéines d'origine animale ont été étudiés en vue d'application en FA. Il convient de citer des purées de différents types de viande [LIP 15], le collagène [INZ 14] et la gélatine [FAR 14]. Néanmoins, certaines études comme celle de [WAN 18] sont très instructives sur les difficultés relatives à ce genre de matrices. En effet, ces auteurs ont étudié l'imprimabilité de gel de surimi, et se sont aperçus que celle-ci était meilleure avec une concentration en chlorure de sodium de 1,5 g NaCl/100 g de surimi. Ce résultat concorde avec ceux de [SEV 16], qui ont constaté une meilleure imprimabilité de préparations à base de viande de bœuf lorsque les protéines myofibrillaires étaient solubilisées, du fait de l'ajout de NaCl. Toujours d'après [WAN 18], leur interprétation d'observations en microscopie électronique ont montré que l'addition de NaCl avait entraîné des réticulations au niveau des protéines myofibrillaires, en permettant la liaison d'acides aminés libres aux protéines, en réduisant les espaces vides et en changeant la structure globale du gel en un réseau à brins fins. Cet effet est maximal, et reste constant, à 1,0 g NaCl/100 g de surimi. L'impression de protéines est donc régie par les propriétés de ces dernières, et notamment par leur agrégation qui elle-même dépend du point isoélectrique (pI). [GOD 16] affirment qu'il serait possible de créer de nouvelles textures en intercalant des couches de protéines alimentaires avec des couches de polysaccharides (ex. : alginat), ou en appliquant un stress thermique ou mécanique ou en utilisant des ingrédients acides ou basiques pendant le procédé de FA pour agir sur l'agrégation. Enfin, [LIU 17] avancent que, pour imprimer correctement des structures 3D à partir d'aliments, l'ajout d'agents texturants comme les hydrocolloïdes ou des protéines solubles capable de gélifier sont nécessaires. Ceci a été confirmé par [YAN 18] pour l'impression de produits à base de viande de dinde.

Les principales protéines structurales (collagène, élastine et fibrine) ont déjà fait l'objet d'études pour la fabrication de supports (*scaffolds*) à architecture complexe pour, notamment, effectuer du dépôt de cellules. L'organisation de ces protéines, sous forme fibreuse, avec notamment des contraintes d'alignement, de diamètre ou de porosité, varie en fonction du type de tissu et influence grandement leurs propriétés mécaniques. La fibrine, protéine naturellement fabriquée par l'organisme, est utilisée pour réparer des lésions et peut être imprimée sous forme de gel [MEL 12] ; [CHI 15]. Cette molécule est notamment utilisée en FA pour la fabrication de *scaffolds* afin de réparer les os, les neurones ou les valvules cardiaques [MUN 16]. Concernant le collagène qui est la protéine la plus abondante chez les mammifères, son impression se fait sous forme de gel, après extraction et digestion enzymatique. D'après [WLO 17], les concentrations des solutions imprimables à base de collagène varient selon les études de 0,2 à 20 mg/mL, en solution tampon à force ionique ajustée. Le choix de la concentration va dépendre des propriétés mécaniques recherchées, comme le maintien de l'intégrité, ou des caractéristiques de viabilité des cellules implantées. Par exemple, un gel à 1 mg/mL permet d'obtenir des structures cohérentes et reproductibles, à condition de maîtriser le pH ; un bouchage des buses d'impression survenant à pH élevé. Le collagène pur n'est pas stable pour former une structure 3D, il doit donc être associé à d'autres polymères. D'ailleurs, sans une réticulation supplémentaire appliquée, le collagène forme des hydrogels aux propriétés mécaniques médiocres. La réticulation peut être induite par voie chimique (formaldéhyde ou glutaraldéhyde), ou par voie enzymatique (transglutaminase) [WLO 17]. Différents moyens ont été mis en œuvre pour permettre d'imprimer des solutions de collagène : jet d'encre, extrusion, impression assistée par laser [INZ 14] ; [JAK 10] ; [WLO 17]. Concernant l'extrusion, des imprimantes multi-têtes et/ou couplées à des systèmes de réticulation existent [SMI 04] ; [SMI 07] ; [PAR 14] ; [HIN 15] cités par [WLO 17]. Toutefois, les principales difficultés pour utiliser le collagène en tant qu'encre biologique par extrusion, selon [MUR 13], cités par [WLO 17], sont le temps important de gélification et le gonflement. Ce dernier point est d'ailleurs souligné par [MUN 16] pour qui, malgré leur facilité d'utilisation pour la construction de structures 3D, les modifications de la géométrie en raison de phénomènes de gonflement ou de dissolution constituent les principales limites à l'utilisation de ces molécules.

Les applications des gels de collagène pour des structures tridimensionnelles sont, par exemple, de permettre le placement de cellules afin d'obtenir une forme donnée, et de permettre d'allonger la viabilité cellulaire. [DUN 89], cités par [MEL 12] ont montré que des hépatocytes conservaient leurs fonctions pendant plusieurs semaines lorsqu'ils étaient placés entre deux couches de gel de collagène contre seulement quelques jours avec une seule couche. Ayant constaté des phénomènes similaires, [MUN 16] affirment que l'allongement de la viabilité cellulaire, grâce à cet hydrogel, serait dû à une meilleure hydratation des cellules, une meilleure agrégation et à une absence de décantation. [SMI 04], cités par [MUN 16], ont mis au point une méthode pour fabriquer une branche d'artère pour un cœur de porc, en utilisant des cellules endothéliales aortiques de bovins en suspension dans du collagène de type 1. Ces données, bien que relatives au domaine médical, peuvent laisser penser que des produits alimentaires fabriqués par FA, et contenant du collagène, pourraient conserver un très bon niveau d'hydratation, influençant ainsi positivement leur texture ou la sensation en bouche.

La gélatine étant un dérivé du collagène, les deux sont donc souvent associés dans la littérature même si leurs propriétés respectives sont différentes. Néanmoins, la gélatine est utilisée dans de nombreuses applications. [MUN 16] ont montré que l'association d'hydrogel de collagène avec de la gélatine permettait, grâce aux propriétés de chacun des deux constituants, de construire un *scaffold* en hydrogel et d'utiliser la gélatine pour créer des tunnels qui correspondront ensuite au réseau vasculaire, une fois que la gélatine aura été dissoute. La gélatine est utilisée pour étudier la communication cellulaire entre bactéries, en créant des microstructures réticulées [CON 13]. Elle est aussi employée pour créer des *scaffolds* par FA pour la régénération du tissu osseux, notamment pour améliorer les propriétés des *scaffolds* en céramique [FAR 14]. Selon [GOD 16], la gélatine est un bon candidat pour être un ingrédient en FA. Les gels de gélatine ont une texture caractéristique qui permet une bonne sensation en bouche, associée à une bonne perception des saveurs. Comme indiqué précédemment, le pI a un rôle majeur sur la structure des protéines. Dans le cas de la gélatine, au pI, sa contraction est maximale, et donc sa viscosité est minimale. Ce dernier paramètre augmentant lorsque le pH est modifié. Mais, si ce changement de pH est trop important, l'extension de la molécule tend alors vers son maximum, et un comportement non-Newtonien de la gélatine est observé ; la gélatine possédant un comportement Newtonien en solution diluée. Le cisaillement ayant également une grande importance sur la viscosité, si celui-ci est trop important, il provoque une chute irréversible de la viscosité [GOD 16].

Afin d'obtenir des géométries complexes à base de produits carnés, [LIP 15] et [GOD 16] évoquent l'utilisation de transglutaminase. Cette enzyme permet d'obtenir de nouvelles matrices protéiques en créant des liaisons covalentes entre des résidus lysine et glutamine, lors d'une réaction calcium dépendante. Ce processus permet donc de *crosslinker* enzymatiquement les protéines présentes dans les purées à base de produits carnés, créant des hydrogels autoportants. Cependant, l'utilisation d'additifs tels que la transglutaminase, bien que très intéressante du point de vue des effets sur les propriétés mécaniques résultantes, est en contradiction avec la tendance actuelle d'un retour à plus de naturel dans les aliments. Aussi, un produit développé par un tel procédé pourrait être mal accueilli par les consommateurs, sans parler de problèmes de règlementation dans certains pays.

Le principal problème pour l'impression d'aliments reste donc l'obtention d'une texture adéquate, permettant une tenue en bouche agréable. Les protéines, en tant que macromolécules structurales importantes n'échappent pas à cet état de fait. Il reste maintenant à élaborer des stratégies d'impression permettant d'obtenir des structures maîtrisées, sans, si possible, utiliser d'additifs texturants (fig. 1).

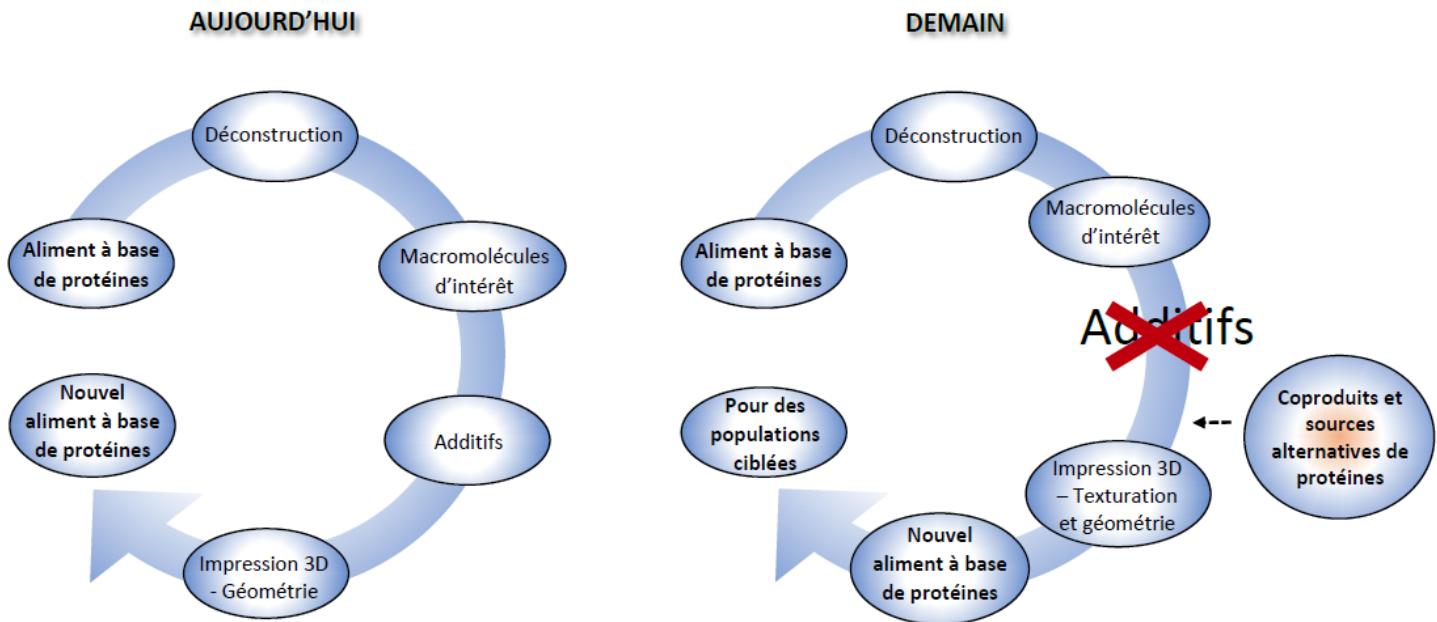


Figure 1. Evolution envisagée pour l'impression 3D de nouveaux aliments à base de protéines dans les années à venir.

3.2. Impact sur les lipides

Même si des études traitant de produits à fort taux en matière grasse comme le chocolat existent, très peu d'études ont investigué l'effet de l'impression 3D sur les lipides, et réciproquement, l'effet des lipides sur l'imprimabilité. A notre connaissance, seuls les travaux de [TOH 18] et de [LIL 18] traitent ce sujet. [TOH 18], dans le cas d'une matrice fromagère non-traitée, c'est-à-dire non-extrudée, ont montré que les globules gras étaient ronds et répartis de façon uniforme dans une phase protéique continue. Une structure comparable a été observée sur du fromage fondu à 75°C avec, néanmoins, des globules gras plus volumineux à cause d'un phénomène de coalescence au cours du chauffage. Après une opération d'impression par extrusion, à 4 mL/min et à 75°C, la microstructure du fromage a été fortement altérée ; la phase protéique est devenue discontinue et une modification morphologique - perte de l'aspect sphérique et augmentation de volume - des globules gras a été observée, avec l'apparition de graisses interstitielles. Toutefois, il semblerait que les paramètres d'impression aient aussi un effet majeur puisque, pour une impression à 12 mL/min (75°C), la taille et la distribution des globules gras étaient plus homogènes. Ceci serait dû au taux du cisaillement plus important dans cette condition. Les interactions entre les protéines et les lipides semblent expliquer les modifications rhéologiques observées pour les fromages imprimés : texture plus “soft”, et moins collante à cause d'une quantité accrue de graisse superficielle libérée pendant le cisaillement.

[LIL 18] se sont intéressés au rôle des lipides pendant l'impression, en travaillant sur de la poudre de lait, à la fois comme sources de protéines et de matière grasse. Deux formulations présentant des taux de protéines équivalents, respectivement 21 et 22%, ont été testées en solution dans de l'eau : écrémée (0,4% MG), et demi-écrémée (9% MG). Ces auteurs ont montré que, pour la formulation écrémée, la pâte était très visqueuse et difficile à imprimer, provoquant un dépôt irrégulier du matériau, à cause d'un caractère trop collant. En passant d'une concentration en poudre de lait de 50 à 60%, l'impression est devenue impossible et ce, quel que soit le diamètre de la buse. Par contre, pour la formulation demi-écrémée, même concentrée à 60%, l'imprimabilité s'est avérée excellente, tant au niveau de la précision que de la conservation de la forme imprimée. [LIL 18] ont expliqué que la matière grasse agissait comme un lubrifiant dans le système d'extrusion et, que le matériau était plus fluide. A noter que le taux en hydrates de carbone était sensiblement différent entre les 2 formulations (32 et 23%, respectivement), ce qui peut également avoir influencé l'écoulement du fluide. Des auteurs

comme [GOD 16] sont optimistes quant à l'utilisation des lipides en FA. Etant donné que la composition en triglycérides et leurs points de fusion différents influencent la texture de la viande, notamment la tendreté et la flaveur, les techniques d'impression 3D (surtout l'extrusion) ont donc le potentiel pour fabriquer des aliments texturés à façon. En utilisant des acides gras à longueur de chaînes différentes, plus ou moins insaturés, il devrait être possible de fixer des points de fusion qui permettraient d'améliorer l'adhésion entre les différentes couches, conduisant ainsi à une meilleure conservation de la géométrie, lors du pré- et du post-traitement.

3.3. Impact sur les hydrates de carbone

Plusieurs travaux ont porté sur l'imprimabilité de différents polymères d'oses. [HOL 18] ont montré qu'il était possible d'imprimer de la cellulose (en poudre), sous forme de couches, à condition de maîtriser les propriétés rhéologiques, la tension de surface et la densité du matériau. [KIM 18], en utilisant la méthylcellulose comme matériau de référence pour simuler l'imprimabilité de différentes encres alimentaires, ont montré que des concentrations en hydrocolloïdes de 9, 11 et 13% permettaient d'obtenir des structures cylindriques de 28 mm de diamètre pour des hauteurs de 20, 40 et 80 mm, respectivement, sans effondrement. Les travaux de [VAN 17] portant sur des formulations imprimables à base de pectine, ont consisté à tester, à paramètres d'impression constants, l'effet de différentes formulations correspondant à différentes vitesses d'agitation et concentrations en pectine, en chlorure de calcium, en sérum albumine bovine (BSA) et en sirop de sucre. Afin d'assurer une structure tridimensionnelle cohérente et pérenne, l'ajout de CaCl_2 s'est avéré nécessaire pour réticuler partiellement la pectine. Cette étude a montré que les concentrations en pectine et en sirop de sucre influençaient directement la viscosité, et que la BSA stabilisait et favorisait l'aération du mélange. [VAN 17] ont démontré la faisabilité d'imprimer des produits alimentaires texturés présentant des microstructures variables.

L'amidon, très utilisé comme additif alimentaire, a lui aussi été étudié. [LIU 18], ont travaillé sur l'impression de purée de pomme de terre, plus ou moins supplémentée en amidon. Les résultats ont montré que, pour être imprimable, la purée devait contenir au moins 2% d'amidon. Dans cette condition, une augmentation de la limite d'élasticité a été constatée, ainsi qu'une meilleure aptitude à l'extrusion. Par contre, à 4% d'amidon, malgré une bonne conservation de la structure tridimensionnelle, l'aptitude à l'extrusion était médiocre en raison d'une viscosité trop élevée. L'étude de [YAN 18] a également confirmé que les glucides complexes comme l'amidon de pomme de terre pouvaient être imprimés. Ces travaux, qui associent jus de citron et amidon (à 15 g/100 g), ont permis de déterminer les paramètres optimaux - diamètre de la buse, vitesse de déplacement et taux d'extrusion - conduisant à des structures présentant une surface lisse et aucune déformation. Les travaux de [LIL 18] ont permis de mettre en évidence, à l'instar des lipides (paragraphe III.2), que l'imprimabilité d'une solution à 15% d'amidon était meilleure lorsque la solution contenait de la poudre de lait demi-écrémée plutôt qu'une formulation écrémée. Cependant, l'écoulement au travers du système d'extrusion étant dépendant de la granulométrie des produits, pour les aliments d'origine végétale contenant des protéines, de l'amidon et des fibres, l'aspect visqueux de l'amidon, associé à la présence de particules entraîne rapidement des problèmes de colmatage.

Au vu des études publiées sur le sujet, deux problèmes majeurs apparaissent pour l'impression alimentaire : 1) la granulométrie des produits utilisés [LIL 18], et 2) les mécanismes de liaison entre les matériaux. Un contrôle des étapes du procédé en amont devrait suffire à répondre aux exigences du premier point ; concernant le second point, des auteurs comme [LIU 17] préconisent d'utiliser des additifs, comme des graisses ou des protéines de plasma sanguin, de façon à améliorer la solidification au refroidissement ou la réticulation. En considérant que, seuls des additifs considérés comme naturels peuvent être utilisés, il est facile d'imaginer utiliser des lipides riches en acides gras insaturés, ce qui permettra aussi d'obtenir un bénéfice santé pour le consommateur.

4. Effet du procédé de fabrication additive sur la conservation des aliments imprimés

4.1. Solutions pour une fabrication sûre

Comme nous avons pu le voir tout au long de cet article, de nombreuses équipes, à travers le monde, s'intéressent à la conception/fabrication d'aliments par FA, mais peu se sont focalisées sur les aspects sanitaires en lien avec ces nouveaux procédés. Si le développement de ces méthodes pour fabriquer des aliments survient réellement, cette question va se poser au cours du procédé, mais aussi pendant la phase de conservation, aussi bien d'un point de vue microbiologique (bactéries pathogènes et d'altération, champignons) que chimique (oxydation, composés néoformés). La plupart des imprimantes actuelles ont été développées en laboratoire, et ne sont en général pas conçues pour être facilement nettoyables et/ou décontaminables. Les futures imprimantes alimentaires devront donc être fabriquées en acier inoxydable et répondre à des normes [LIP 15] afin de limiter les contaminations croisées entre aliments, tout en minimisant le temps d'exposition à l'air libre du produit imprimé (présence d'oxygène, température élevée...). Ceci est confirmé par l'étude de [SEV 18], la seule à notre connaissance ayant trait à l'évolution sanitaire d'un aliment imprimé. Ces auteurs ont imprimé un *smoothie* à base de fruits et légumes, et ont suivi son évolution microbiologique pendant huit jours alors que le produit était conservé à 5°C, à l'air (20% O₂, 80% N₂) ou sous atmosphère modifiée (5% O₂ et 95% N₂). Les concentrations microbiennes (flore mésophile, psychrophile et levures) étaient dénombrées dans les échantillons à J0, entre 4 et 5 log CFU.g⁻¹. Ces concentrations sont restées stables entre J0 et J6, quelles que soient les conditions de conservation, puis une diminution a été observée jusqu'à J8. Les auteurs ont expliqué cette contamination importante par l'imprimante elle-même, du fait des pistons, des tubes ou de l'extrudeuse, car les ingrédients avaient été préalablement soigneusement lavés.

Selon [KIN 17], le contexte alimentaire mondial, avec une population estimée à plus de 9 milliards d'humains d'ici 2050, va nécessiter 70% de ressources alimentaires supplémentaires et des systèmes de production durables. La sécurité alimentaire est donc un défi qui doit être au cœur des recherches, au même titre que le vieillissement de la population dans les pays industrialisés, dont une grande partie pourra être immunodéprimée, et les attentes des consommateurs vis-à-vis des aliments *clean label*. Ces auteurs évoquent donc l'hypothèse de fabriquer des aliments "extra-safe", en utilisant des procédés d'irradiation, de stérilisation ou de pasteurisation qui ciblent les personnes les plus fragiles. Concernant la FA alimentaire, [KIN 17] émettent quelques réserves, notamment sur le fait que chacun pourra, chez lui, fabriquer des aliments sans nécessairement bien contrôler leur activité de l'eau et leur pH, et donc pouvant présenter des risques sanitaires certains. La personnalisation d'aliments déjà évoquée dans la présente étude inquiète également [KIN 17]. En effet, pour le moment, les consommateurs semblent plus préoccupés par les aspects nutritionnels que sanitaires, risquent de modifier, par exemple, les flores microbiennes des aliments, et de ce fait générer des effets potentiellement négatifs sur leur propre microbiote intestinal. Il est donc clair que le développement de la FA alimentaire, qu'il soit au niveau domestique ou industriel, devra être soumis à des obligations réglementaires fortes pour pallier le manque de recul évident sur cette technologie et éviter tout risque sanitaire.

La qualité microbiologique de l'aliment imprimé mérite d'être prise en considération dès la conception même du procédé d'impression. En effet, l'aliment imprimé cru doit-il être cuit directement après la phase d'impression ? Ou bien, doit-il être conditionné tel quel ? Ces deux options n'auront pas les mêmes conséquences d'un point de vue sanitaire. Imaginons maintenant un produit *lambda*, imprimé cru dans des conditions de stérilité maîtrisées. La technologie actuelle pourrait nous permettre d'imprimer directement son emballage, cette étape pourrait donc être directement intégrée au procédé. Nous pouvons imaginer que cet emballage soit comestible et qu'il ne soit donc pas nécessaire de le retirer pour cuire ou consommer le produit. L'emballage pourrait même avoir une action bactériostatique ou bactéricide, en utilisant des composés naturels [MOG 17] ; [SAB 17]. Dans ce cas, aucune intervention humaine n'étant nécessaire en aval de l'impression, le risque de contamination microbiologique sera de ce fait nettement réduit.

L'autre intérêt de bien réfléchir à la conception du procédé est de faciliter le stockage du produit après conditionnement. Un procédé parfaitement maîtrisé, associant impression et emballage, pourrait permettre de conserver l'aliment à une température ambiante, sans réfrigération, ce qui pourrait réduire considérablement la consommation d'énergie, et serait fort utile notamment dans les pays chauds.

4.2. La problématique du post-traitement

Les opérations de post-traitement telles que le séchage, la cuisson, la friture, mais également de pré-traitement comme les ultra-sons et les radiofréquences, affectent les propriétés rhéologiques des matériaux, particulièrement au niveau de la formation des gels. Pour des aliments plus consistants, comme de la purée de bœuf maigre, le maintien de la structure tridimensionnelle après cuisson, impose d'ajouter 0.5% de transglutaminase [LIU 17]. Des auteurs comme [LIL 18] pensent que les opérations de post-traitement pourraient avoir un impact positif sur l'aliment imprimé, par exemple, le séchage pourrait permettre d'augmenter leur rigidité. A ce propos, [LIL 18] ont montré que la lyophilisation préservait beaucoup mieux les structures qu'un séchage au four, qui avait tendance à provoquer un retrécissement. La teneur en eau du produit est également un paramètre important, car plus il y aura d'eau à éliminer, plus la structure risque de se déformer.

Le manque de données, dans la littérature, concernant les étapes de post-traitement est évident. Différents articles soulignent que des recherches sont à mener pour déterminer les traitements les plus adaptés de pré- ou post-impression [LIU 17], et que la maîtrise des propriétés physico-chimiques, rhéologiques et mécaniques des aliments est essentielle [GOD 16]. De plus, l'aspect sanitaire n'est absolument pas traité à ce jour. Nous pouvons, néanmoins, citer les travaux très prometteurs d'une équipe de l'université de Columbia (travaux non publiés, diffusés par CNN Tech, www.3dnatives.com/impression-3d-en-video-04022018/). En effet, dans cette étude, les aliments sont imprimés, puis cuits au moyen d'un laser directement dans l'imprimante. Cette approche est intéressante puisqu'elle permettrait de cuire les aliments couches par couches, et, de ce fait, de détruire les microorganismes directement au cœur de l'aliment.

5. Ecoconception et durabilité de la fabrication additive

5.1. Consommation en énergie et en matières premières

Un certain nombre d'études traitant essentiellement de la fabrication d'objets, et non de produits alimentaires, s'intéressent aux effets de la FA sur l'environnement, ou tout du moins tentent d'investiguer ses effets potentiels avant une industrialisation à grande échelle [BUR 15] ; [JAC 16]. Ceci se traduit par une évaluation de la consommation énergétique (électricité), ou bien par une estimation de l'économie en matières premières [HUA 12]. Même si le gain en matière première inhérent à l'ajustement de la géométrie [JIN 17] semble largement partagé dans la littérature, la question de la consommation électrique est plus problématique. Selon [KEL 17], l'énergie nécessaire par unité de fabrication est une à deux fois plus élevée pour la FA que pour un usinage conventionnel ou un moulage par injection, et même jusqu'à cent fois selon [YOO 14]. Cependant, cet impact environnemental plus élevé pourrait être minimisé par l'optimisation des pièces fabriquées et la production de pièces plus légères, notamment dans le domaine des transports : automobile, aéronautique ou chemins de fer. D'après [HUA 12] et [PEN 16], les procédés d'impression 3D ont, en général, de meilleures caractéristiques environnementales que les procédés traditionnels. Les méthodes de FA n'étant, pour l'instant, que peu exploitées en conditions industrielles, il est donc difficile de quantifier les effets dans le cas d'une production de masse. Néanmoins, [MOG 06] ont montré que des paramètres ajustés permettraient d'économiser 40 à 60% de l'énergie sur certains types de machines. Bien qu'avançant des conclusions similaires, [GRI 16] sont plus mesurés sur la transposition des résultats d'ajustement de paramètres à d'autres procédés, et indiquent que des modèles spécifiques pour la fabrication additive doivent être conçus. En mettant en œuvre une approche globale, basée sur l'analyse du cycle de vie, les travaux de [BOU 14] ont montré qu'il était possible de développer des

outils d'évaluation de l'impact de ces technologies sur l'environnement, aussi bien sur le plan de la consommation électrique que celle de fluides et de matériaux. Ces auteurs ont aussi mis en évidence que la consommation de matériaux impactait plus l'environnement que la consommation électrique elle-même. [WAT 18] ont très récemment développé un modèle afin de comparer la consommation énergétique entre la FA et la fabrication soustractive. Ce modèle prend en compte l'intégralité du cycle de vie du processus de fabrication : production, transport et recyclage des matières premières, traitement des déchets de post-production et énergie consommée par l'équipement au repos. Les conclusions de cette étude, plutôt décevantes, indiquent qu'il est difficile d'obtenir certaines données, notamment liées aux valeurs énergétiques de production de certains matériaux, et surtout que les résultats de la modélisation sont très difficilement extrapolables pour étudier les différents *scenarii* de processus de fabrication.

Selon [PEN 16], cinq actions permettent de réduire les émissions de carbone : 1) réduire la quantité de matière première, et donc leur extraction/production, 2) réduire l'utilisation de procédés industriels très énergivores (fonderie) et très consommateurs de produits (fluides d'usinage polluants), 3) concevoir efficacement et de manière flexible les produits, en optimisant la performance des procédés, 4) réduire la masse des composants de façon à diminuer l'empreinte carbone des moyens de transport terrestres et aériens (évoqué aussi par [HUA 12]), et 5) limiter les effets de la logistique en faisant que la fabrication soit réalisée au plus proche de la zone de consommation. Ce dernier point est également évoqué par [HUA 12] et [KIE 15] qui ajoutent le fait que ce mode de production permettrait de réduire les stocks, en ne fabriquant les objets qu'à la demande. Ceci éviterait également de fabriquer des pièces de rechange qui risqueraient de ne jamais être utilisées, notamment dans le secteur de l'aéronautique. Le recyclage des matériaux imprimés est également un avantage non négligeable de la FA qu'il faut souligner [KIE 15]. L'impact environnemental des technologies de FA reste encore à définir précisément. La littérature actuelle reflète assez bien les questions et les contradictions en vue d'une utilisation à grande échelle. Cependant, de nombreuses voies de recherche sont encore à explorer afin de dissiper certaines approximations, notamment dans les évaluations de consommation d'énergie, dans l'analyse des cycles de vie, ou bien encore celle des effets des technologies 3D sur la santé humaine, comme l'émission de composés organiques volatils. Ces différents éléments sont mis en avant dans l'article de [REJ 18]. En considérant l'exemple d'un procédé d'impression par extrusion, l'emploi de matériaux plastiques oblige à travailler à des températures élevées, augmentant de ce fait la consommation énergétique. Dans le cas d'applications alimentaires, les températures seront moindres, surtout si les produits sont imprimés crus. Il est donc facilement imaginable que la consommation d'énergie sera bien moins élevée pour ce type de produit.

5.2. Valorisation des coproduits par fabrication additive

A notre connaissance, seuls [LUP 16] et [LUP 17] évoquent le fait que des aliments issus de la technologie 3D pourraient avoir un impact positif sur l'environnement, en permettant de réduire les déchets, de réduire la part du transport avec une fabrication locale, de réutiliser des aliments classés comme non-consommables, d'utiliser des aliments de substitution ou bien encore de développer des emballages comestibles.

D'après [FAO 12], 33% des denrées alimentaires, qu'elles soient d'origine végétale ou animale, sont gaspillées ou perdues chaque année à travers le monde, soit 1.3 milliard de tonnes par an : 30% des céréales, 20% des viandes et des produits laitiers et 45% des fruits et légumes. Dans les pays en voie de développement, 40% des pertes ont lieu en amont de la chaîne, au moment de la récolte, de la post-récolte ou de la transformation. Alors que, dans les pays industrialisés, plus de 40% des pertes se produisent en aval, lors de la distribution et chez les consommateurs. Les causes des pertes et gaspillages sont donc multiples et parfois basées uniquement sur l'apparence des produits [FAO 12]. Dans ces pertes et gaspillages, figurent également certains coproduits animaux riches en protéines comme les abats, ainsi que les parties non comestibles des animaux comme les os, les tendons et les plumes. L'ADEME (Agence française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) définit un

coproduit comme étant une matière, intentionnelle et inévitable, créée au cours du même processus de fabrication et en même temps que le produit principal. Le produit fini principal et le coproduit doivent tous les deux répondre à des caractéristiques spécifiques, et chacun est apte à être utilisé directement pour un usage particulier. Des recherches sont donc menées aujourd’hui pour valoriser certains coproduits à des fins non-alimentaires en utilisant la FA. Citons, par exemple, [SIN 17] qui travaillent sur la conception de biomatériaux issus de plumes de volaille. En effet, étant donné leur teneur en protéines élevée, les plumes peuvent servir de base à la fabrication de *scaffolds* sur-mesure et biocompatibles. Compte tenu du gisement important, notamment de protéines de très bonne qualité, constitué par les produits animaux qui sont très coûteux à produire, il est donc logique de se poser la question de savoir comment valoriser au mieux ces coproduits par fabrication additive afin d’élaborer des aliments innovants à fonctionnalités ciblées.

Ces dernières années, les habitudes de consommation de la viande de bœuf ont fortement évolué. De plus en plus de morceaux ne sont plus utilisés dans des préparations culinaires traditionnelles, comme le pot-au-feu ou le Bourguignon. Ceci s’explique par une évolution du mode de vie des consommateurs, où, le temps de préparation de certaines recettes apparaît trop long, et ceci, sans compter le fait que, seuls les morceaux les plus tendres sont désormais appréciés, ou bien encore la mode actuelle pour les burgers. C'est donc désormais, dès leur plus jeune âge, que les consommateurs s'habituent à manger des aliments tendres, voire mous. Différentes voies technologiques sont donc possibles pour valoriser autrement les viandes, notamment bovines, qui sont actuellement, soit transformées en steak haché, soit mal valorisées car présentant un niveau de tendreté initiale très moyen : 1) travailler sur l’attendrissement mécanique des viandes, en optimisant les procédés de barattage [DAU 16] ; 2) concevoir des aliments innovants par FA. Dans les 2 cas, l’objectif est d’élaborer des produits carnés présentant une texture maîtrisée qui soient parfaitement adaptés aux personnes âgées souffrant de troubles masticatoires et/ou de dysphagie, ou à toute autre population cible. Le muscle n'est pas le seul élément qui pourrait être valorisé par FA. Comme indiqué précédemment, le collagène est utilisé, notamment, dans le domaine médical pour la fabrication de *scaffolds* [INZ 17]. Cette protéine, considérée comme un coproduit, car issue de la peau ou des tendons des bovins et des porcins, a également de multiples usages en industrie alimentaire (gélatine) ; elle pourrait trouver toute sa place dans l’élaboration d’aliments à fonctionnalités ciblées conçus par FA (fig. 1). La mise en œuvre du potentiel de structuration du collagène par FA pourrait permettre de mettre au point des aliments à base de viande ou d’abats peu valorisés, dont la texture serait adaptée aux populations visées. En effet, actuellement, les seules études traitant d’aliments carnés conçus par FA [GOD 16] ; [SEV 16], utilisent des purées ou de la viande hachée, sauf celles relatant la fabrication de tissus entiers obtenus par multiplication de cellules souches [LIP 15]. Les travaux de [SHA 17], dédiés à des applications orthopédiques, pourraient inspirer de nouvelles voies de recherche dans le domaine alimentaire. La fabrication d’architectures (*scaffolds*) à base de collagène, où le motif et la porosité seraient définis, pourrait servir de base à la fabrication d’aliments carnés à texture maîtrisée.

6. Vers des aliments personnalisables à fonctionnalités ciblées

Au vu du développement rapide des technologies 3D en alimentaire, des auteurs comme [WEG 12], [SUN 15b], [DER 18], [LIU 17], [SEV 18] ou [KOU 17] pensent que la personnalisation est une voie d’avenir dans ce domaine, qui pourrait être boostée par une large diffusion des imprimantes culinaires domestiques ; par exemple, les sociétés *Natural Machines* et *Print2Taste* avec leurs produits destinés au grand public, Foodini et Bocusini, respectivement. L’article de [LIU 17] donne d’ailleurs un aperçu des différentes applications de la personnalisation d’aliments - populations souffrant d’une pathologie, militaires, astronautes... - et des difficultés inhérentes - précision d’impression pour des structures délicates et complexes, vitesse d’impression... Parmi les populations concernées, la plus citée dans la littérature est celle des personnes âgées souffrant de sarcopénie ou de dysphagie. D’après [THO 07], la sarcopénie se traduit par une perte de la masse de muscle squelettique ayant pour conséquence une réduction de la force musculaire, aboutissant à une perte d’autonomie, à l’apparition de douleurs et au

prolongement des hospitalisations. Il est estimé que les personnes de plus de 60 ans seront 1.4 milliard en 2030 et 2.1 milliards en 2050 à l'échelle mondiale (dont 202 millions de personnes de plus de 80 ans en 2030 et 434 millions en 2050), or il n'existe pas d'outils thérapeutiques efficaces contre cette pathologie. Une des stratégies thérapeutiques consiste à apporter les nutriments essentiels pour cette population au travers de l'alimentation [LUO 17]. C'est à ce niveau que la FA alimentaire peut intervenir en proposant de nouveaux aliments à la composition maîtrisée et aux saveurs adaptées. Concernant la dysphagie dont souffrent 15 à 25% des seniors [SUN 15a], elle touche principalement les personnes ayant été victimes d'un AVC, de paralysie, ou de la maladie de Parkinson... Le réflexe de déglutition étant altéré, la texture des aliments doit donc être adaptée : purées, liquides épaissis [KOU 17]. La texture de l'aliment est donc au centre des préoccupations pour ces pathologies liées au vieillissement de la population. La conception d'aliments par impression 3D permettrait à ces populations de pouvoir consommer plus facilement des aliments riches en protéines animales, sans que ceux-ci ne soient forcément réduits en purée.

Dans leur étude, [DER 18] soulignent la difficulté qu'ont les personnes à respecter les recommandations nutritionnelles concernant la prise de cinq fruits et légumes par jour ; seulement 10 % de la population italienne suivrait ces recommandations. Ceci a pour conséquence que certains enfants et adolescents sont touchés par des carences en vitamines et en minéraux, notamment fer et calcium. Ceci est en partie dû aux difficultés qu'éprouvent les parents pour leur faire manger certains aliments. La personnalisation par impression 3D pourrait permettre de mettre au point des aliments ou des compléments d'aliments nutritionnellement adaptés à cette population, en jouant sur les saveurs et les textures. [DER 18] ont fabriqué un *snack* composé des ingrédients suivants de façon à couvrir les besoins recommandés : banane (pour l'appétence), champignons déshydratés, haricots blancs, lait écrémé déshydraté, jus de citron, acide ascorbique (antioxydant) et pectine (11% pour la consistance et éviter la séparation de phases). Tous ces ingrédients ont été mixés, puis imprimés selon une géométrie définie, en contrôlant la vitesse et le débit d'impression. Les résultats obtenus ont montré que le débit avait une forte influence sur la microstructure, avec une structure irrégulière et des filaments interrompus à faible débit. A plus fort débit, une meilleure fusion des filaments était observée, mais au détriment de la porosité (augmentation du volume total). Malgré certaines difficultés, notamment rhéologiques, cette étude a prouvé qu'il était possible d'imprimer des aliments à fonctionnalités ciblées pour une population spécifique [DER 18]. Il aurait toutefois été intéressant d'avoir le ressenti de la population cible, notamment sur le plan organoleptique et de l'acceptabilité.

Les deux catégories de population qui viennent d'être citées (seniors et enfants/adolescents) ne sont pas les seules concernées par une personnalisation des aliments. Un grand nombre de "sous-populations" représentant une masse d'individus plus ou moins importante sont également directement concernées : les sportifs, les femmes enceintes, les personnes allergiques ou les jeunes adultes ne cuisinant pas, par manque de temps ou d'envie. Mais, là où ces nouvelles technologies pourraient apporter un réel bénéfice, serait pour améliorer la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale et lutter contre la famine. Ce fléau touche un grand nombre de pays dans le monde, et les personnes concernées ont des besoins spécifiques. La FA pourrait donc permettre d'aider ces populations en maximisant la composition nutritionnelle des aliments et en associant différentes sources de nourriture : produits carnés, algues, graines de lupin, insectes... [LUP 17].

Pour [LIP 17], qui s'intéresse principalement aux populations occidentales, il existe deux raisons principales pour l'utilisation de la FA en alimentaire : la santé et les préférences des consommateurs. Cet auteur prend l'exemple de la population américaine, où 4% des personnes présentent des allergies alimentaires, où une fraction importante de la population a des problèmes de digestion (intolérance au lactose...), où 60 à 70 millions d'américains sont concernés par un régime alimentaire lié à différentes pathologies (maladie de Crohn, syndrome du côlon irritable...), et où 69% de la population est en surpoids ou obèse. Et ce, sans compter les personnes présentant des problèmes de mastication ou de dysphagie. [LIP 17] pense que la personnalisation de masse des aliments de façon automatisée

(contrôlée par ordinateur), permettrait, non seulement de faciliter la vie de certains malades, mais également d'abaisser la probabilité de contamination par un allergène ou d'exclure totalement un ingrédient.

Cette dimension de personnalisation a fait l'objet de quelques études à travers le monde. Nous pouvons citer de nouveau le projet Européen PERFORMANCE, ainsi que les travaux de [KOU 17] qui s'attachent à trouver des solutions pour les personnes atteintes de dysphagie, en développant une imprimante permettant de fabriquer des aliments à base de purées (thon, citrouille, betterave) qui soient visuellement appétissants. Ces auteurs soulignent qu'il existe des travaux sur l'impression alimentaire, mais que très peu traitent des aspects liés à l'amélioration de la vie des personnes ayant des besoins spécifiques en matière de repas. Toujours d'après ces auteurs, l'impression 3D pourrait servir à automatiser la production d'aliments en purée et en liquides épais, à améliorer la consistance et la répétabilité des aliments produits en terme de texture et d'humidité, à améliorer les expériences sensorielles gustatives et à fabriquer des aliments en purée visuellement attrayants et épais pour les personnes souffrant de dysphagie.

7. Acceptabilité par les consommateurs d'un procédé innovant

Les consommateurs ont tendance à exiger des aliments moins transformés, ne contenant pas d'additifs. Néanmoins, il est intéressant de se demander comment, dans le cas de pathologies avérées et sévères liées à une dénutrition, serait perçu un aliment enrichi, par exemple en protéines, conçu par FA et qui offrirait des propriétés mécaniques et nutritionnelles optimales ? Il serait alors possible de définir deux domaines distincts pour l'application de la FA en alimentaire : les aliments de consommation courante sans additifs et les aliments à vocation thérapeutique, présentant un niveau de transformation plus élevé. Mais, dans ce cas, seraient-ils encore perçus comme des aliments ? Et, si oui, comment intégrer ces aliments dans la diète quotidienne ?

Comme évoqué précédemment, une des voies d'application potentielle de la FA alimentaire est la fabrication de tissu musculaire à partir de cellules souches. Dans leurs études, [SIE 17] et [CAR 15] ont montré que, sur ce point, les consommateurs étaient à la recherche d'aliments les plus naturels possibles, et que la production traditionnelle de viande était mieux perçue que la viande "in vitro", même si cette dernière est plus respectueuse de l'environnement et du bien-être animal. Néanmoins, ces travaux soulignent également que les consommateurs s'appuient sur des informations symboliques, mais à fort impact, pour évaluer un aliment. Une enquête approfondie sur l'attitude des consommateurs à l'égard d'une nouvelle technologie et la diffusion d'informations simples et avisées seraient donc à même d'éclairer le consommateur de façon pertinente sur l'intérêt d'un nouveau procédé, ou d'une nouvelle façon de consommer. Avec cet objectif, [BRU 17], en questionnant 2047 personnes, ont constaté que les connaissances en matière d'impression 3D alimentaire étaient faibles. Néanmoins, ces auteurs ont pu tester l'effet positif d'informations ciblées sur les consommateurs, en mettant en avant que la technologie pourrait les soutenir dans la préparation de repas sains et individualisés, tout en y ajoutant une dimension ludique. Ceci est confirmé par [LUP 17] qui affirme que, pour être accepté, une nouvelle technologie ou un nouvel aliment doit convaincre les consommateurs de son potentiel et de sa valeur, tout en les rassurant. Comme il a été explicité au cours de cet article, aujourd'hui, la conception d'un aliment par FA peut difficilement s'affranchir de l'emploi d'additifs [HAM 18], notamment pour faciliter sa texturation, surtout dans le cas des produits carnés. [EVA 10] ont mis en évidence que les consommateurs étaient aussi plus réticents aux modifications chimiques d'un aliment qu'aux modifications physiques. Or pour l'instant, la FA cumule ces deux types de transformation. Tout l'intérêt est donc de poursuivre les recherches dans le domaine, de façon à limiter au maximum l'ajout d'additifs, tout en améliorant le procédé. [LUP 16] confortent cet avis, en indiquant que le développement des technologies de FA en alimentaire ne se fera qu'à condition de conserver un côté "naturel" aux aliments. Cette vision permettra aux consommateurs de préserver le côté affectif associé à la nourriture et de passer outre l'aspect transgressif de la technologie. Cette étude aborde également

le débouché qui semble le plus important pour la FA alimentaire : la personnalisation. En effet, si la perception des aliments fabriqués par FA est orientée sur des aspects nutritionnels/santé, ou sur la lutte contre la malnutrition, alors la technologie pourra devenir un atout et non un frein à la consommation de produits imprimés. Les marchés de niches, la gestion des ressources naturelles, la sécurité alimentaire ou la créativité culinaire sont autant de facteurs qui permettront d'adopter ce type de procédé.

L'impression 3D alimentaire pourrait avoir toute sa place en tant que nouveau procédé, et ne serait pas plus révolutionnaire, dans la conscience collective, que l'utilisation du four à micro-ondes, à son époque. Même si, selon [BRU 17], le fait d'émettre des points de comparaison entre une nouvelle et une ancienne technologie ne suffit pas à faire tomber les réticences concernant la nouvelle, une néophobie persistante, voire renforcée, peut être observée chez certaines personnes. La génération "Z" (personnes nées à partir de 2000), rien qu'en France, représentera demain, 75% des actifs. Cette génération va bouleverser les habitudes alimentaires que nous connaissons actuellement par l'utilisation des outils numériques, qui seront omniprésents. La livraison à domicile à toute heure, l'influence des réseaux sociaux sur la façon de consommer, et le suivi de son alimentation par des applications dédiées feront émerger de nouvelles façons de se nourrir, où la FA trouvera probablement toute sa place. D'ailleurs, selon plusieurs études, une personne sur deux dans la catégorie des 18-24 ans est prête à utiliser une imprimante 3D alimentaire dans l'avenir [NPD 17] ; [KAN 17]. Selon [NIE 15], quatre catégories de "Millennials" (personnes nées entre 1980 et 2000, appelées aussi génération "Y") vont coexister. En effet, des consommateurs soucieux de l'environnement et de l'impact environnemental des procédés liés à l'alimentation côtoieront des personnes attirées par la high-tech, des personnes soucieuses de leur pouvoir d'achat, ou bien des personnes à la fois sensibles aux innovations, mais souhaitant conserver certaines valeurs traditionnelles. Ce sont toutes ces sensibilités que les chercheurs et ingénieurs devront prendre en compte pour développer la FA alimentaire. Une autre catégorie de personnes, cette fois multigénérationnelle, pourra avoir une forte influence sur la façon de consommer, en particulier les produits carnés : ce sont les adeptes du flexitarisme, qui est un mode de vie où la consommation en produits carnés est modérée, réduite, voire fortement réduite, mais encore présente dans l'alimentation. Alors que les végétariens représentent environ 1,7% de la population française et les végétaliens 0,5%, les flexitariens représentent 34% des foyers, avec 19% des flexitariens ayant moins de 35 ans [KAN 16]. Cette population, convaincue des problèmes écologiques qui existent, pourrait être sensible à des arguments relatifs à la valorisation de coproduits et à la limitation du gaspillage alimentaire. Les flexitariens pourraient également être une cible privilégiée pour la conception de nouveaux aliments à base de différentes sources de protéines, comme nous l'avons déjà évoqué. L'étude de [NOO 17] constitue une bonne piste de travail concernant ces aspects. Ces auteurs, en plus d'avoir développé un pilote d'impression capable d'imprimer 60 repas à l'heure, et utilisé une approche multi-échelle pour apporter une texture particulière aux aliments, ont procédé à des tests d'enrichissement du produit initial. En travaillant sur des produits végétaux, ils ont conservé 80% de l'ingrédient principal, et ajouté 20 % de protéines, de matières grasses, de micronutriments et d'agents gélifiants. Ceci montre qu'il est possible d'imprimer des aliments comportant différentes sources de protéines ou d'autres macromolécules. Il est donc tout à fait envisageable d'utiliser une approche similaire pour les produits carnés, en leur accordant une valeur nutritionnelle supplémentaire, et en adoptant une démarche de développement durable dans laquelle des produits carnés, des matières grasses et des protéines d'origine végétale, ou provenant d'algues, de champignons ou d'insectes pourraient être combinés.

8. Conclusion et évolutions prévisibles

L'impression 3D est, sans conteste, une technologie d'avenir dans de nombreux domaines. L'industrie agro-alimentaire peut, elle aussi, utiliser ces procédés innovants afin de répondre à des problématiques actuelles qui impacteront les générations futures. Apporter des solutions nutritionnelles clé-en-main à des populations, jusque-là exclues de certains marchés du fait de leurs pathologies, ou

privées d'accès réguliers aux ressources ou disposant d'un pouvoir d'achat limité représente une somme de défis considérable et complexe, mais néanmoins surmontable. La résolution de ces problématiques passera, à n'en pas douter, par la personnalisation à plus ou moins grande échelle de nouveaux procédés de fabrication additive, ou de valorisation des produits. Au regard de cette étude, il apparaît que l'impression 3D alimentaire est sur une voie de progrès et de développement. De nombreux produits sont ou seront bientôt prêts à être commercialisés. Il reste néanmoins à régler le problème des aliments carnés, où le principal verrou technologique reste la texturation des produits imprimés. Pour les prochaines années, l'enjeu majeur sera donc de développer par impression 3D des produits carnés ou des produits mixant différentes sources de protéines qui soient parfaitement structurés, sans avoir besoin de recourir à l'utilisation d'additifs. La dernière étape consistera ensuite à faire accepter les aliments imprimés par les consommateurs. Sur ce point, si les méthodes et les intérêts sont correctement explicités aux consommateurs, l'acceptabilité se fera, à notre sens, sans difficulté majeure, notamment auprès des futures générations d'actifs, dont beaucoup combineront, vraisemblablement, flexitarisme et hyper-connexion. Nous assistons sûrement actuellement aux prémisses de la nouvelle révolution industrielle que pourrait constituer la fabrication additive. Alors pourquoi pas dans le domaine de la fabrication des produits alimentaires, l'avenir nous le dira.

La bibliographie

- [ALM 17] ALMELA, T., BROOK, I. M., KHOSHROO, K., RASOULIANBOROUJENI, M., FAHIMIPOUR, F., TAHRIRI, M., DASHTIMOGHADAM, E., EL-AWA, A., TAYEBI, L., & MOHARAMZADEH, K. « Simulation of cortico-cancellous bone structure by 3D printing of bilayer calcium phosphate-based scaffolds ». *Bioprinting*, 6, p. 1-7, 2017.
- [ATT 17] ATTARAN, M. The rise of 3-D printing: « The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing ». *Business Horizons*, 60(5), p. 677-688, 2017.
- [BOS 18] BOSE, S., KE, D., SAHASRABUDHE, H., & BANDYOPADHYAY, A. « Additive manufacturing of biomaterials ». *Progress in Materials Science*, 93, p. 45-111, 2018.
- [BRU 17] BRUNNER, T. A., DELLEY, M., & DENKEL, C. « Consumers' attitudes and change of attitude toward 3D-printed food ». *Food Quality and Preference*. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.12.010>, 2017.
- [BUR 15] BURKHART, M., & AURICH, J. C. « Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle ». *Procedia CIRP*, 29, p. 408-413, 2015.
- [CAR 15] CAROCHO, M., MORALES, P., & FERREIRA, I. C. F. R. « Natural food additives: Quo vadis? ». *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), p. 284-295, 2015.
- [CHE 17] CHEN, X., LI, J., CHENG, X., HE, B., WANG, H., & HUANG, Z. « Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing ». *Materials Science and Engineering: A*, 703, p. 567-577, 2017.
- [CHI 15] CHIA, H. N., & WU, B. M. « Recent advances in 3D printing of biomaterials ». *Journal of Biological Engineering*, 9 (1), p. 4, 2015.
- [CON 13] CONNELL, J. L., RITSCHDORFF, E. T., WHITELEY, M., & SHEAR, J. B. « 3D printing of microscopic bacterial communities ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(46), p. 18380-18385, 2013.
- [DAU 16] DAUDIN, J.-D., SHAREDEH, D., FAVIER, R., PORTANGUEN, S., AUBERGER, J.-M., & KONDJOYAN, A. « Design of a new laboratory tumbling simulator for chunked meat: Analysis, reproduction and measurement of mechanical treatment ». *Journal of Food Engineering*, 170, p. 83-91, 2016.
- [DER 18] DERROSSI, A., CAPORIZZI, R., AZZOLLINI, D., & SEVERINI, C. « Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children ». *Journal of Food Engineering*, 220, p. 65-75, 2018.
- [DUN 89] DUNN, J.C.Y., YARMUSH, M.L., KOEBE, H.G., TOMPKINS, R.G. « Hepatocyte function and extracellular matrix geometry long-term culture in a sandwich configuration ». *Federation of American Societies for Experimental Biology (FASEB) Journal*, 3, p. 174-177, 1989.
- [EVA 10] EVANS, G., DE CHALLEMAISON, B., & COX, D. N. « Consumers' ratings of the natural and unnatural qualities of foods ». *Appetite*, 54(3), p. 557-563, 2010.
- [FAO 12] FAO « Pertes et gaspillages alimentaires dans le monde - Ampleur, causes et prévention ». Rome, Italy, p. 41, 2012.

- [FAR 14] FARAG, M. M., & YUN, H.-S. « Effect of gelatin addition on fabrication of magnesium phosphate-based scaffolds prepared by additive manufacturing system ». *Materials Letters*, 132, p. 111-115, 2014.
- [FOR 16] FORD, S., MORTARA, L., & MINSHALL, T. « The emergence of additive manufacturing: Introduction to the special issue ». *Technological Forecasting and Social Change*, 102, p. 156-159, 2016.
- [GAU 11] GAUSEMEIER, J., ECHTERHOFF, N., KOKOSCHKA, M., & WALL, M. « Thinking ahead the future of additive manufacturing – Analysis of promising industries». (p. 103). Germany: University of Paderborn, DMRC, 2011.
- [GOD 16] GODOI, F. C., PRAKASH, S., & BHANDARI, B. R. « 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects». *Journal of Food Engineering*, 179, p. 44-54, 2016.
- [GRI 16] GRIFFITHS, C. A., HOWARTH, J., DE ALMEIDA-ROWBOTHAM, G., REES, A., & KERTON, R. « A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing». *Journal of Cleaner Production*, 139, p. 74-85, 2016.
- [GRO 14] GROSS, B. C., ERKAL, J. L., LOCKWOOD, S. Y., CHEN, C., & SPENCE, D. M. « Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences». *Analytical Chemistry*, 86(7), p. 3240-3253, 2014.
- [GUD 16] GUDAPATI, H., DEY, M., & OZBOLAT, I. « A comprehensive review on droplet-based bioprinting: Past, present and future ». *Biomaterials*, 102, p. 20-42, 2016.
- [HAM 18] HAMILTON, C. A., ALICI, G., & in het PANHUIS, M. « 3D printing Vegemite and Marmite: Redefining “breadboards” » *Journal of Food Engineering*, 220, p. 83-88, 2015.
- [HIN 15] HINTON, T.J, JALLERAT, Q, PALCHESKO, R.N., PARK, J.H, GRODZICKI, M.S, SHUE, H.J., RAMADAN, M.H, HUDSON, A.R, A.W, FEINBERG, A.W. « Three-dimensional printing of complex biological structures by freeform reversible embedding of suspended hydrogels ». *Science Advances*, 1(9), <https://doi: 10.1126/sciadv.1500758>, 2015.
- [HOL 18] HOLLAND, S., FOSTER, T., MACNAUGHTAN, W., & TUCK, C. « Design and characterisation of food grade powders and inks for microstructure control using 3D printing ». *Journal of Food Engineering*, 220, p. 12-19, 2012.
- [HUA 12] HUANG, S. H., LIU, P., MOKASDAR, A., & HOU, L. « Additive manufacturing and its societal impact: a literature review ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), p. 1191-1203, 2012.
- [ICT 17] ICTEN, E., PUROHIT, H. S., WALLACE, C., GIRIDHAR, A., TAYLOR, L. S., NAGY, Z. K., & REKLAITIS, G. V. « Dropwise additive manufacturing of pharmaceutical products for amorphous and self-emulsifying drug delivery systems ». *International Journal of Pharmaceutics*, 524(1-2), p. 424-432, 2017.
- [INZ 14] INZANA, J. A., OLVERA, D., FULLER, S. M., KELLY, J. P., GRAEVE, O. A., SCHWARZ, E. M., KATES, S. L., & AWAD, H. A. « 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration ». *Biomaterials*, 35(13), p. 4026-4034, 2014.
- [JAC 16] Jackson, M. A., Van Asten, A., Morrow, J. D., Min, S., & Pfefferkorn, F. E. « A comparison of energy consumption in wire-based and powder-based additive-subtractive manufacturing ». *Procedia Manufacturing*, 5, p. 989-1005, 2016.
- [JAK 10] JAKAB, K., NOROTTE, C., MARGA, F., MURPHY, K., VUNJAK-NOVAKOVIC, G., & FORGACS, G. « Tissue engineering by self-assembly and bio-printing of living cells ». *Biofabrication*, 2(2), <https://doi: 10.1088/1758-5082/2/2/022001>, 2010.
- [JIN 17] JIN, Y., DU, J., & HE, Y. « Optimization of process planning for reducing material consumption in additive manufacturing ». *Journal of Manufacturing Systems*, 44, p. 65-78, 2017.
- [KAN 17] KANTAR TNS. FoodTech: « les Millenials révolutionnent l'alimentation ». www.mbanmci.com. (<https://mbamci.com/foodtech-millenials-et-alimentation/>), 2017.
- [KAN 16] KANTAR WORLD PANEL « A la découverte des « flexitariens » : Qui sont ces foyers qui souhaitent réduire leur consommation de protéines animales ? » Newsletter n°48. <https://www.kantarworldpanel.com/fr/A-la-une/Newsletter-48>, 2016.
- [KEL 17] KELLENS, K., MERTENS, R., PARASKEVAS, D., DEWULF, W., & DUFLOU, J. R. « Environmental impact of additive manufacturing processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing? » *Procedia CIRP*, 61, p. 582-587, 2017.
- [KIE 15] KIETZMANN, J., Pitt, L., & BERTHON, P. « Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing ». *Business Horizons*, 58(2), p. 209-215, 2015.

- [KIM 18] KIM, H. W., BAE, H., & PARK, H. J. « Reprint of: Classification of the printability of selected food for 3D printing: Development of an assessment method using hydrocolloids as reference material ». *Journal of Food Engineering*, 220, p. 28-37, 2018.
- [KIN 17] KING, T., COLE, M., FARBER, J. M., EISENBRAND, G., ZABARAS, D., FOX, E. M., & HILL, J. P. « Food safety for food security: Relationship between global megatrends and developments in food safety ». *Trends in Food Science & Technology*, 68, p. 160-175, 2017.
- [KOU 17] KOUSANI, A. Z., ADAMS, S., WHYTE, D. J., OLIVER, R., HEMSLEY, B., PALMER, S., & BALANDIN, S. (2017). « 3D printing of food for people with swallowing difficulties ». In S. o. E. Paul K. Collins, Deakin University and Ian Gibson, School of Engineering, Deakin University (Ed.), *DesTech Conference Proceedings. The International Conference on Design and Technology*, (p. 23-29). Australia: Deakin University, 2017.
- [KRU 17] KRUIJATZ, F., LODE, A., SEIDEL, J., BLEY, T., GELINSKY, M., & STEINGROEWER, J. « Additive biotech-chances, challenges, and recent applications of additive manufacturing technologies in biotechnology ». *New Biotechnology*, 39(Pt B), p. 222-231, 2017.
- [LAN 17] LANARO, M., FORRESTAL, D. P., SCHEURER, S., SLINGER, D. J., LIAO, S., POWELL, S. K., & WOODRUFF, M. A. « 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation ». *Journal of Food Engineering*, 215, p. 13-22, 2017.
- [BOU 14] LE BOURHIS, F., KERBRAT, O., DEMBINSKI, L., HASCOET, J.-Y., & MOGNOL, P. « Predictive model for environmental assessment in additive manufacturing process ». *Procedia CIRP*, 15, p. 26-31, 2014.
- [TOH 18] LE TOHIC, C., O'SULLIVAN, J. J., DRAPALA, K. P., CHARTRIN, V., CHAN, T., MORRISON, A. P., KERRY, J. P., & KELLY, A. L. « Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese ». *Journal of Food Engineering*, 220, p. 56-64, 2018.
- [LIL 18] LILLE, M., NURMELA, A., NORDLUND, E., METSÄ-KORTELAINEN, S., & SOZER, N. « Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing ». *Journal of Food Engineering*, 220, p. 20-27, 2018.
- [LIP 15] LIPTON, J. I., CUTLER, M., NIGL, F., COHEN, D., & LIPSON, H. « Additive manufacturing for the food industry ». *Trends in Food Science & Technology*, 43(1), p. 114-123, 2015.
- [LIP 17] LIPTON, J. I. « Printable food: the technology and its application in human health ». *Current Opinion in Biotechnology*, 44, p. 198-201, 2017.
- [LIU 17] LIU, Z., ZHANG, M., BHANDARI, B., & WANG, Y. « 3D printing: Printing precision and application in food sector ». *Trends in Food Science & Technology*, 69, p. 83-94, 2017.
- [LIU 18] LIU, Z., ZHANG, M., BHANDARI, B., & YANG, C. « Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing ». *Journal of Food Engineering*, 220, p. 76-82, 2018.
- [LUO 17] LUO, D., LIN, Z., LI, S., & LIU, S.-J. « Effect of nutritional supplement combined with exercise intervention on sarcopenia in the elderly: A meta-analysis ». *International Journal of Nursing Sciences*, 4(4), p. 389-401, 2017.
- [LUP 17] LUPTON, D. « 'Download to delicious': Promissory themes and sociotechnical imaginaries in coverage of 3D printed food in online news sources ». *Futures*, 93, p. 44-53, 2017.
- [LUP 16] LUPTON, D., & TURNER, B. « 'Both fascinating and disturbing': Consumer responses to 3D food printing and implications for food activism ». In K. E. Tanja Schneider, Catherine Dolan and Stanley Ulijaszek (Ed.), *Digital Food Activism*, (p. 17). London: Routledge, 2016.
- [MAN 17] MANTHAL, S., PRAKASH, S., GODOI, F. C., & BHANDARI, B. « Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling ». *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, p. 21-29, 2017.
- [MAW 16] MAWALE, M. B., KUTHE, A. M., & DAHAKA, S. W. « Additive layered manufacturing: State-of-the-art applications in product innovation ». *Concurrent Engineering*, 24(1), p. 94-102, 2016.
- [MEL 12] MELCHELS, F. P. W., DOMINGOS, M. A. N., KLEIN, T. J., MALDA, J., BARTOLO, P. J., & HUTMACHER, D. W. « Additive manufacturing of tissues and organs ». *Progress in Polymer Science*, 37(8), p. 1079-1104, 2012.
- [MOG 17] MOGHIMI, R., ALIAHMADI, A., & RAFATI, H. « Antibacterial hydroxypropyl methyl cellulose edible films containing nanoemulsions of Thymus daenensis essential oil for food packaging ». *Carbohydrate Polymers*, 175, p. 241-248, 2017.
- [MOG 06] Mognol, P., Lepicart, D., & Perry, N. « Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight ». *Rapid Prototyping Journal*, 12(1), p. 26-34, 2006.

- [MUN 16] MUNAZ, A., VADIVELU, R. K., St. JOHN, J., BARTON, M., KAMBLE, H., & NGUYEN, N.-T. « Three-dimensional printing of biological matters ». *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1(1), p. 1-17, 2016.
- [MUR 13] MURPHY, S. V., SKARDAL, A., & ATALA, A. « Evaluation of hydrogels for bio-printing applications ». *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 101(1), p. 272-284, 2013.
- [NOO 17] NOORT, M., VAN BOMMEL, K., & RENZETTI, S. « 3D-Printed Cereal Foods ». *Cereal Foods World*, 62(6), p. 272-277, 2017.
- [PAL 16] PALLOTTINO, F., HAKOLA, L., COSTA, C., ANTONUCCI, F., FIGORILLI, S., SEISTO, A., & MENESATTI, P. « Printing on food or food printing: A review ». *Food and Bioprocess Technology*, 9(5), p. 725-733, 2016.
- [PAR 14] PARK, J.Y, CHOI, J.C, SHIM, J.H, LEE, J.S, PARK, H, KIM, S.W, DOH, J, CHO, D.W. « A comparative study on collagen type I and hyaluronic acid dependent cell behavior for osteochondral tissue bioprinting ». *Biofabrication* 6(3), <https://doi: 10.1088/1758-5082/6/3/035004>, 2014.
- [PEN 16] PENG, T. « Analysis of energy utilization in 3D printing processes ». *Procedia CIRP*, 40, p. 62-67, 2016.
- [REJ 18] REJESKI, D., ZHAO, F., & HUANG, Y. « Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing ». *Additive Manufacturing*, 19, p. 21-28, 2018.
- [SAB 17] SABERI, B., CHOCHKACHAISAWASDEE, S., GOLDING, J. B., SCARLETT, C. J., & STATHOPOULOS, C. E. « Characterization of pea starch-guar gum biocomposite edible films enriched by natural antimicrobial agents for active food packaging ». *Food and Bioproducts Processing*, 105, p. 51-63, 2017.
- [SEV 16] SEVERINI, C., DERROSSI, A., & AZZOLLINI, D. « Variables affecting the printability of foods: Preliminary tests on cereal-based products ». *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, p. 281-291, 2016.
- [SEV 18] SEVERINI, C., DERROSSI, A., RICCI, I., CAPORIZZI, R., & FIORE, A. « Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects ». *Journal of Food Engineering*, 220, p. 89-100, 2018.
- [SHA 17] SHANJANI, Y., KANG, Y., ZARNESCU, L., ELLERBEE BOWDEN, A. K., Koh, J. T., Ker, D. F. E., & Yang, Y. « Endothelial pattern formation in hybrid constructs of additive manufactured porous rigid scaffolds and cell-laden hydrogels for orthopedic applications ». *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 65, p. 356-372, 2017.
- [SIE 17] SIEGRIST, M., & SUTTERLIN, B. « Importance of perceived naturalness for acceptance of food additives and cultured meat ». *Appetite*, 113, p. 320-326, 2017.
- [SIN 17] SINGH, S., & RAMAKRISHNA, S. « Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future ». *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 2, p. 105-115, 2017.
- [SMI 04] SMITH, C.M., STONE, A. L., PARKHILL, R.L., STEWART, R.L., SIMPKINS, M.W., KACHURIN, A.M., WARREN, W.L., WILLIAMS, S.K. « Three-dimensional bioassembly tool for generating viable tissue-engineered constructs ». *Tissue Engineering*, 10(9-10), p. 1566-1576, 2004.
- [SUN 15a] SUN, J., PENG, Z., YAN, L., FUH, J. Y. H., & HONG, G. S. « 3D food printing—An innovative way of mass customization in food fabrication ». *International Journal of Bioprinting*, 1(1), p. 27-38, 2015a.
- [SUN 15b] SUN, J., ZHOU, W., HUANG, D., FUH, J. Y. H., & HONG, G. S. « An overview of 3D printing technologies for food fabrication ». *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), p. 1605-1615, 2015b.
- [NIE 15] THE NIELSEN COMPANY « Zoom sur les Millenials ». www.nielsen.com, 2015.
- [NPD 17] THE NPD GROUP « Millenials : les 18-34 ans redessinent la restauration de demain ». www.npdgroup.fr, 2017.
- [THO 07] THOMPSON, D. D. « Aging and sarcopenia ». *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions*, 7(4), p. 344-345, 2007.
- [VAN 17] VANCAUWENBERGHE, V., KATALAGARIANAKIS, L., WANG, Z., MEERTS, M., HERTOG, M., VERBOVEN, P., MOLDENERS, P., HENDRICKX, M. E., LAMMERTYN, J., & NICOLAÏ, B. « Pectin based food-ink formulations for 3-D printing of customizable porous food simulants ». *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 42, p. 138-150, 2017.
- [WAN 18] WANG, L., ZHANG, M., BHANDARI, B., & YANG, C. « Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing ». *Journal of Food Engineering*, 220, p. 101-108, 2018.
- [WAT 18] WATSON, J. K., & TAMINGER, K. M. B. « A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption ». *Journal of Cleaner Production*, 176, p. 1316-1322, 2018.

- [WEG 12] WEGRZYN, T. F., GOLING, M., & ARCHER, R. H. « Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods ». *Trends in Food Science & Technology*, 27(2), p. 66-72, 2012.
- [WLO 17] WŁODARCZYK-BIEGUN, M. K., & DEL CAMPO, A. « 3D bioprinting of structural proteins ». *Biomaterials*, 134, p. 180-201, 2017.
- [YAN 18] YANG, F., ZHANG, M., BHANDARI, B., & LIU, Y. « Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters ». *LWT - Food Science and Technology*, 87, p. 67-76, 2018.
- [YOO 14] YOON, H.-S., LEE, J.-Y., KIM, H.-S., KIM, M.-S., KIM, E.-S., SHIN, Y.-J., CHU, W.-S., & AHN, S.-H. « A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study ». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(3), p. 261-279, 2014.
- [ZEL 17] ZELENY, P., & RUZICKA, V. « The design of the 3d printer for use in gastronomy ». *Modern Machinery (MM) Science Journal*, p. 1744-1747, 2017.
- [ZHA 18] ZHAO, H., WANG, J., REN, X., LI, J., YANG, Y.-L., & JIN, X. « Personalized food printing for portrait images ». *Computers & Graphics*, 70, p. 188-197, 2018.