

Impression 3D : équipements agricoles et innovations alimentaires

L'impression 3D est un procédé de conception par dépôt de couches successives de matière, suivant un modèle numérique. Les premières imprimantes domestiques mises sur le marché présentaient les limites habituelles des technologies émergentes : coûteuses, complexes et aux réalisations limitées. Quatre décennies plus tard, de nombreuses entreprises, dont celles de l'agroalimentaire et du machinisme agricole, utilisent ces imprimantes pour diverses applications industrielles. Ce procédé s'étend à l'impression d'aliments, avec des perspectives novatrices en matière de santé, de nutrition et de personnalisation de la consommation. La diffusion de cette technologie pose aussi bien des questions sanitaires et d'acceptabilité sociale, que d'ordre juridique sur la propriété intellectuelle ou la garantie de la qualité des pièces imprimées.

L'impression 3D est un procédé piloté informatiquement consistant à déposer des couches de matériaux pour concevoir des objets en trois dimensions. Cette méthode est aussi appelée « fabrication additive », par opposition à l'usinage traditionnel des pièces qui repose sur la soustraction de matière. Plusieurs phases du processus de production sont à distinguer. La première consiste dans la modélisation numérique en trois dimensions de l'objet à réaliser en utilisant un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) ou en numérisant l'objet à l'aide d'un scanner 3D. Ensuite, un autre logiciel (*licer*) découpe en tranches horizontales le volume modélisé. Enfin sont transmises à l'imprimante les informations relatives à la trajectoire, la vitesse et la quantité de matière des couches.

Depuis le premier brevet enregistré par l'américain Chuck Hill en 1984, plusieurs procédés ont été développés, variant selon le type de technologie, le principe de dépôt et les matériaux en entrée (figure 1). Ces quatre dernières décennies, l'impression 3D s'est perfectionnée et a atteint une maturité technologique suffisante pour s'intégrer aux processus de production de différents secteurs industriels (automobile, aérospatial, médical, bâtiment, etc.). À partir des années 2000, ce procédé s'est étendu à l'impression d'aliments. Sur la dernière décennie, le nombre de brevets internationaux déposés a augmenté huit fois plus vite que pour l'ensemble des autres domaines technologiques¹. Ainsi, aux diverses

applications industrielles de la fabrication additive (prototypage, conception d'outillages spécifiques, gestion des pièces de rechange, produits au design personnalisé ou sur-mesure), s'ajoutent désormais les nouvelles perspectives ouvertes par l'impression alimentaire en matière de santé, de nutrition et de durabilité.

La première partie de cette note, consacrée à la fabrication additive d'objets, retrace l'évolution de son utilisation par le grand public et les industriels, en s'intéressant particulièrement à ses applications et potentialités en agroalimentaire et agriculture. La deuxième partie, centrée sur l'impression 3D alimentaire, décrit ses spécificités et ses apports en réponse aux tendances actuelles et futures : personnalisation, médicalisation, remplacement des produits carnés, etc.

1 - La fabrication additive d'objets

Des promesses à la réalité industrielle

La commercialisation de la première imprimante 3D domestique, en 2005, a suscité un engouement des médias et du grand public. La promesse que tout un chacun pourrait imprimer chez soi des objets du quotidien, personnalisés, a toutefois été confrontée aux réalités d'une technologie émergente : coûteuse, complexe à maîtriser et aux réalisations limitées. Ces premières imprimantes ont donc été réservées, dans un premier temps, aux bricoleurs technophiles. Des communautés

d'utilisateurs passionnés se sont constituées, pour échanger leurs pratiques et partager des fichiers de modèles 3D d'objets à imprimer, à l'instar de celle portant depuis 2005 le projet *open source* RepRap (imprimante auto-répliquative qui peut reproduire et améliorer toutes les pièces la constituant).

Aujourd'hui, ces imprimantes domestiques se démocratisent du fait de leur prix moindre (entrée de gamme à partir de 200 €), d'une meilleure qualité de finition et d'une utilisation plus simple. Elles deviennent également de plus en plus accessibles, à travers différentes structures : universités, centres de recherche, *FabLabs* (vaste réseau mondial de laboratoires locaux établi sur les principes du partage des outils de fabrication numérique, des savoirs et des compétences), etc.

L'usage professionnel de ces imprimantes (figure 2) a joué un rôle moteur dans le développement de cette technologie. Dans l'industrie, la fabrication additive simplifie le processus de production d'une pièce, par rapport aux méthodes conventionnelles, en le réduisant à une seule machine, mobilisant une main-d'œuvre moindre, sans recours à de l'outillage spécifique et en consommant uniquement la quantité de matériaux nécessaire. Cette flexibilité de production de pièces, à coûts et délais réduits, a conduit de plus en plus d'entreprises à y recourir : réalisation de prototypes, conception d'outillages spécifiques et de gabarits

1. Office européen des brevets, 2023, [Fabrication additive : tendances en matière d'innovation](#).

Figure 1 - Technologies et matériaux associés selon les sept procédés d'impression (norme ASTM F42)

Procédé d'impression	Description	Technologie(s) associée(s)	Matériaux pour la fabrication additive							Impression 3D alimentaire
			Polymères	Composites	Métaux	Alliages	Céramique	Sable de moulage	Cire	
Extrusion de matière	Des filaments thermoplastiques sont chauffés puis extrudés par la tête d'impression (buse) formant une couche solidifiée par refroidissement	• Dépôt de fil fondu (FDM)	x	x	x		x	x		x
Projection de matière	Des gouttes de matières sont projetées sélectivement sur la plateforme de fabrication par des têtes d'impression, puis solidifiées par une lumière ultraviolette ou par refroidissement	• Projection de gouttes de matière (MJ)	x	x	x		x		x	x
Projection de liant	Un liant projeté par des buses encolle sélectivement des particules de poudre réparties de manière homogène sur la plateforme d'impression	• Projection de liant (BJ)	x	x	x		x	x	x	x
Fusion de poudre	Une énergie thermique (laser ou faisceau d'électrons) vient fusionner sélectivement un lit de poudre réparti sur la plateforme d'impression	• Frittage laser sélectif (SLS) • Frittage laser direct de métal (DMLS) • Fusion par faisceau d'électrons (EBM) • Fusion laser sélective (SLM)	x	x	x		x	x	x	x*
Photopolymérisation	Le matériau liquide est solidifié sélectivement par une lumière ultraviolette	• Photopolymérisation de résine (SLA/DLP)	x	x			x		x	
Stratification de matériau en feuilles	Des feuilles du matériau sont découpées par un laser, puis superposées pour être collées les unes aux autres	• Fabrication d'objets laminés (LOM, SL) • Consolidation par ultrasons (UC)	x	x	x	x				x
Dépôt de matière sous flux d'énergie dirigé	Fondu par une source d'énergie dans la buse, le matériau est déposé sélectivement sur la plateforme d'impression	• Dépôt de métal au laser (LMD)			x	x				

Source : auteur

* Pour l'impression par fusion de poudre, seule la technologie par frittage laser sélectif (SLS) est utilisée en impression 3D alimentaire.

nécessaires à l'usinage traditionnel, production de pièces finies en volume limité, produits personnalisés. Depuis les prothèses personnalisées jusqu'à la géométrie complexe des pièces de *concept-cars*, les applications de l'impression tridimensionnelle sont aussi diverses que les secteurs qui l'utilisent : médecine, industrie du luxe, aérospatial, électronique, etc.

En 2019², 17 % des sociétés françaises de plus de 250 personnes l'utilisaient, dans les secteurs principalement marchands³. Avec un taux moyen d'accroissement annuel de 25 %, sur les 34 dernières années, le marché mondial de la fabrication additive industrielle (ventes d'imprimantes, logiciels, matériaux et services associés) s'élevait à 17 milliards de dollars en 2022⁴. Il devrait atteindre la barre des 20 milliards en 2023, selon certaines estimations⁵. Majoritairement utilisés par les entreprises en complément de leur usinage conventionnel, la fabrication additive pourrait devenir une alternative pour la production à grande échelle de pièces finies, au fur et à mesure de l'abaissement de certaines barrières technologiques : diminution du temps de production pour des volumes de masse, moindres limites de taille des pièces imprimables, amélioration de la qualité de finition, élargissement de la gamme de matériaux imprimables, etc. Selon le Conseil économique, social et environnemental⁶, la maîtrise de cette technologie résumait bien, dès 2015, « l'équation

que l'économie française doit résoudre pour bénéficier de cette nouvelle croissance fondée sur l'articulation entre innovations technologiques et performance industrielle, le respect des ressources naturelles et l'évolution des modes de consommation ».

Les applications dans l'agroalimentaire et l'agriculture

Les entreprises de l'agroalimentaire recourent principalement à la fabrication additive pour produire rapidement des pièces de remplacement (défectueuses ou usées) des machines des lignes de production (racleurs, bandes modulaires des convoyeurs, etc.). Pouvant être aussi employée pour la fabrication des buses alimentaires d'extrusion (production de gâteaux, biscuits, glaces), l'impression tridimensionnelle offre la possibilité de concevoir des formes complexes en une seule pièce, là où le fraisage traditionnel aurait nécessité le soudage de plusieurs pièces, dont les joints et les angles sont propices à la contamination bactérienne. Des poudres d'impression sont commercialisées, répondant aux besoins spécifiques du secteur en matière de résistance mécanique, d'entretien et de certifications internationales pour le contact avec les aliments. Pour autant, au cours de l'année 2019⁷, en France, seulement 3 % des industries agroalimentaires (de 10 personnes

ou plus) ont eu recours, en propre ou par l'intermédiaire d'un prestataire de services, à l'impression 3D, contre 13 % pour l'ensemble des industries manufacturières⁸.

Dans le secteur du machinisme agricole, certaines entreprises commencent à recourir à cette technologie pour la production de pièces. John Deere équipe ses dernières générations de tracteurs avec des vannes de carburant en acier imprimées en 3D⁹. Selon le tractoriste, ces pièces faciliteraient l'écoulement du fluide pour un coût de production moitié moindre à celui

2. Dernières données disponibles à partir de l'enquête Insee de 2020 sur les technologies de l'information et de la communication et le commerce électronique (TIC) dans les entreprises implantées en France.

3. INSEE, 2021, *Internet des objets, impression 3D, robotique : des technologies davantage utilisées par les grandes sociétés*.

4. Wholers Associates, 2023, *Wholers Report 2023*.

5. Hubs, 2023, *3D printing trend report 2023*.

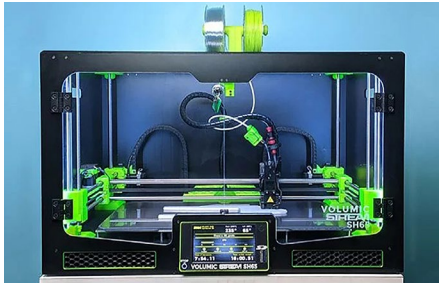
6. Cese, 2015, *Innovations technologiques et performance industrielle globale : l'exemple de l'impression 3D*.

7. Dernières données disponibles à partir de l'enquête Insee de 2020 sur les technologies de l'information et de la communication et le commerce électronique (TIC) dans les entreprises implantées en France.

8. Apicella L., 2022, « Utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans l'agroalimentaire », *Chiffres et données*, n° 2022-1.

9. Vidéo de présentation de l'usine John Deere à Mannheim, mise en ligne le 9/11/2022.

Figure 2 - Imprimante 3D professionnelle utilisant la technologie FDM



Source : 3Dnatives

de l'usinage traditionnel. La société envisage la mise en place d'entrepôts numériques, pour imprimer en 3D des pièces de rechange. Cette stratégie a déjà été adoptée par le groupe CNH Industrial, fabricant de machines agricoles (Case IH, New Holland) depuis 2020 et la survenue de la crise sanitaire du Covid-19. L'adoption de cette technologie, et la systématisation de la numérisation des pièces des équipements agricoles, prémuniraient les fabricants d'éventuels problèmes d'approvisionnement. Elle leur permettrait aussi de mettre fin aux coûts induits liés à la gestion et au stockage de ces pièces, voire même de reporter leurs coûts de production sur les centres de réparation et les usagers équipés d'une imprimante. Quant aux agriculteurs, ils se verraient ainsi assurer la disponibilité dans le temps des pièces de leurs équipements.

Du côté des agriculteurs, la sophistication croissante des équipements accroît leurs charges de mécanisation (achat, entretien, réparation), ainsi que leur dépendance vis-à-vis des fabricants : coût et disponibilité des pièces, réseaux des concessionnaires déployés pour leur réparation, etc. Après plusieurs années de litige, la Fédération des agriculteurs américains a conclu, en janvier 2023, un accord¹⁰ avec John Deere dans lequel le fabricant s'engage à fournir, aux propriétaires de machines et aux centres

de réparation indépendants, les informations, codes d'accès et logiciels nécessaires à la réparation des équipements. Actuellement, seuls quelques agriculteurs technophiles impriment eux-mêmes des pièces de rechange pour leurs équipements. Une diffusion de l'impression 3D, associée à la mise à disposition (sous licences d'utilisation) des modèles numériques des pièces de rechange, leur offrirait une capacité d'auto-réparation, réduisant les délais pour se les procurer. Une communauté d'agriculteurs mutualisant les améliorations apportées à leurs matériels, par le partage des fichiers numériques des plans en 3D, pourrait devenir dans les prochaines années la version *high-tech* du mouvement *low-tech* incarné en France aujourd'hui par la coopérative L'Atelier paysan, qui vise une réappropriation des outils grâce à l'auto-conception. Se poseraient alors des questions d'ordre juridique quant à la garantie de la qualité de ces pièces imprimées et à la responsabilité en cas de défaillance.

2 - Impression 3D alimentaire

Un intérêt croissant, à la croisée de plusieurs domaines de recherche

L'impression 3D alimentaire (I3DA) comporte les mêmes phases que la fabrication additive d'objets (numérisation, préparation du matériau, impression, post-traitement), mais elle se limite aux procédés d'extrusion (le plus utilisé), de frittage sélectif, de jet de liant et de jet d'encre (figure 1). Elle se distingue aussi par la phase de préparation des ingrédients en encre alimentaire imprimable, pouvant se présenter à l'état liquide, pâteux ou bien sous forme de poudres ou de cultures cellulaires. Les propriétés physiques et biologiques de cette encre conditionnent le choix de la méthode d'impression et son paramétrage (hauteur des couches, vitesse d'impression, diamètre de la buse), pour obtenir la structure, le goût, la couleur et la texture attendus pour le produit final¹¹. L'I3DA nécessite donc d'associer plusieurs disciplines : l'ingénierie, la physique, la

biologie, les arts culinaires. Technologie apparue au début des années 2000, son procédé, ses applications et son acceptabilité font l'objet de plus en plus de recherches (figure 3), en écho à un marché mondial en pleine croissance (évalué à 238 millions de dollars en 2022 et qui pourrait atteindre 1,6 milliard de dollars en 2030¹²). Plusieurs sociétés (byFlow, Natural Machines, Choc Edge Ltd, etc.) commercialisent des imprimantes alimentaires à destination du grand public, à des prix allant de 1 000 à 4 000 euros. Quant aux modèles professionnels destinés aux restaurateurs, pâtisseries et industriels de l'agroalimentaire, ils peuvent dépasser les 10 000 euros.

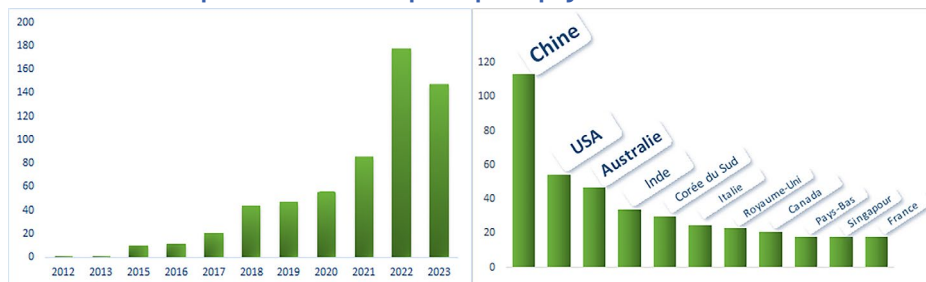
Vers une alimentation personnalisée

L'impression 3D accompagne la tendance à l'individualisation de la cuisine, observée ces dernières décennies dans la plupart des pays¹³. Elle apporte des réponses à deux aspects de cette démarche de personnalisation. Tout d'abord elle donne la possibilité au mangeur de choisir l'apparence de son plat, d'en moduler les caractéristiques organoleptiques (saveur, texture en bouche) selon ses préférences, tout en maîtrisant le choix des ingrédients. Par exemple, des imprimantes à usage domestique proposent de sélectionner une recette dans une banque de données (encore limitée aux purées, biscuits, pâtes, etc.), de la moduler selon ses préférences, de choisir l'aspect du plat à réaliser.

L'adoption de cette technologie modifierait notre rapport à l'alimentation. D'une part elle orienterait vers une cuisine simplifiée et pouvant paraître plus ludique et créative (figure 4), pour les nouvelles générations de plus en plus connectées. D'autre part, légumes, fruits et viandes seraient de plus en plus dématérialisés. Contenus dans des cartouches alimentaires (sous forme de pâte, liquide, poudre), les caractéristiques physiques (goût, odeur, forme, texture, valeurs nutritionnelles) des ingrédients deviendraient des informations numérisées et leurs associations résulteraient de suggestions faites par des algorithmes.

Des conditions strictes d'entretien de ces machines domestiques seront à respecter, pour limiter les risques allergènes ou de contamination microbienne. En amont, des conséquences sur la production agricole sont aussi à envisager. Pourrait notamment se mettre en place une nouvelle filière de destinations des productions agricoles, approvisionnant les cartouches de ces imprimantes alimentaires, avec certains avantages : fin des critères esthétiques ou de calibrage des denrées agricoles, simplification

Figure 3 - Nombre d'articles scientifiques sur l'impression 3D alimentaire selon l'année de publication et les principaux pays des instituts de recherche



Source : auteur

Notes : données obtenues à partir d'une requête posée dans la base de recherche de publications scientifiques et de brevets The Lens. La requête consistait à rechercher dans les champs « titre » ou « résumé » ou « mots clés » la présence d'une des expressions suivantes : « 3D food printing » OR « Three-Dimensional food printing » OR « Three-Dimensional printed food » OR « 3D printed food » OR « Three-Dimensional Printing of Foods » OR « 3D Printing of Foods » OR « 3D Printing Food » OR « Three-Dimensional Printing Food ».

10. [Protocole d'accord signé entre l'American Farm Bureau Federation et John Deere](#), janvier 2023.

11. Waseem M. *et al.*, 2023, « [Printing the future of food : The physics perspective on 3D food printing](#) », *Food Physics*.

12. 360iResearch, 2023, [3D Food Printing Market Research Report - Global Forecast 2023-2030](#).

13. Héroult B. *et al.*, 2019, [Transformations sociétales et grandes tendances alimentaires](#), document de travail, n° 13, Centre d'études et de prospective, ministère de l'agriculture et de l'alimentation.

Figure 4 - Exemples de réalisations d'une imprimante 3D alimentaire commercialisée



Crédit : Natural Machines

de la chaîne logistique (emballage, stockage), etc. Cette filière spécifique pourrait aussi comporter des inconvénients : contractualisation et meilleure rémunération des producteurs et donc concurrence directe avec les produits frais, délaissement des productions françaises et accentuation du sourcing international du fait de la transportabilité des ingrédients pour imprimantes, etc.

La personnalisation alimentaire proposée par l'I3DA peut aussi être considérée sous l'angle des bénéfices pour la santé. Les caractéristiques nutritionnelles (protéines, fibres, vitamines, etc.) d'un plat peuvent être adaptées aux besoins de régimes spécifiques, à des catégories de personnes (athlètes, femmes enceintes, personnes âgées, etc.) ou en réponse à certaines pathologies (obésité, insuffisance rénale, etc.). Des sociétés l'utilisent d'ores et déjà pour préparer des plats dont la texture facilite la mastication et l'ingestion de personnes souffrant de dysphagie. Partant d'informations relatives à un individu donné (glycémie, état du microbiote, caractéristiques génétiques issues de tests ADN), l'I3DA permettrait de confectionner des repas prenant en compte les besoins personnels à court terme (état de forme, pathologies avérées), mais aussi à plus long terme (prédispositions à certaines maladies, espérance de vie)¹⁴.

Au service du développement des nouveaux aliments

Les impacts de la consommation, et notamment des choix alimentaires, sont de plus en plus débattus. L'affirmation de nouveaux régimes, limitant ou supprimant la viande et les produits animaux (flexitarisme, végétarisme, végétalisme, véganisme, etc.), répond à des préoccupations environnementales, sanitaires, de bien-être animal, etc. Conciliant ces aspirations et l'attachement culturel à la viande, des sociétés de la *FoodTech* (écosystème d'entrepreneurs et *startups* innovant dans le secteur de l'alimentation)

concentrent leurs efforts sur de nouveaux aliments alternatifs aux protéines animales. Ils sont composés de substituts végétaux ou obtenus à partir de cellules animales cultivées¹⁵. Ces entreprises axent leurs stratégies (recherche, développement, marketing, communication) sur des alternatives alimentaires ressemblant le plus possible aux produits carnés, afin de faciliter leur adoption par le consommateur. Les principaux acteurs du domaine (Redefine Meat, Novameat, Aleph Farms, Revo Foods, etc.) s'appuient sur les techniques de bio-impression 3D, développées par le secteur biomédical pour la fabrication d'organes artificiels, afin de reconstituer la structure complexe des différents types de cellules (musculaires, adipeuses) de la viande. L'I3DA leur sert à reproduire au plus près la sensation fibreuse de la viande, lors de la mastication, mais aussi à obtenir cette ressemblance sur les plans visuel, gustatif et nutritionnel.

De premières entreprises parviennent à dépasser les contraintes de temps et de coût de l'impression alimentaire. Elles commercialisent d'ores et déjà, à grande échelle, des produits se situant dans la gamme de prix des produits conventionnels. Par exemple, est commercialisé, en Espagne depuis novembre 2023, dans 400 magasins du groupe Carrefour, un produit d'origine végétale imprimé en 3D visant à reproduire l'aspect et la texture du bacon.

Les possibilités offertes par l'I3DA permettront aussi d'augmenter, à l'avenir, l'adoption de nouveaux produits par les consommateurs, ouvrant ainsi la voie à une diversification des sources alimentaires (algues, insectes, etc.) et à de nouvelles réductions du gaspillage (utilisation des fruits ou légumes « moches », des déchets alimentaires), soit en les intégrant comme ingrédients de plats imprimés, soit en les présentant sous des aspects plus attrayants. Pour autant, demeurera la question de l'acceptabilité de la technologie elle-même et des produits ultra-transformés qui en seront issus, de la part de consommateurs de plus en plus nombreux à dire qu'ils recherchent une alimentation plus naturelle et plus saine. Si l'I3DA parvient à être acceptée en reproduisant, dans un premier temps, formes, textures, couleurs et goûts des produits alimentaires conventionnels, elle ouvrira alors un vaste nouveau marché aux acteurs de la *FoodTech*, pour imprimer des aliments proposant de nouvelles expériences culinaires et fonctions alimentaires.

*

Différents secteurs industriels ont progressivement intégré la fabrication additive dans leurs processus de production de biens (prototypage, outillage, design personnalisé, produits sur-mesure). À terme, cette technologie pourrait réellement devenir un choix alternatif à l'usinage traditionnel des pièces finies, et pour leur

production à grande échelle. Dans l'industrie agroalimentaire, l'utilisation de cette technologie en contact avec les aliments est strictement réglementée, afin de limiter les risques de contamination microbienne et de libération de microparticules plastiques toxiques par les composants de l'imprimante. Sa généralisation auprès du grand public, qu'il s'agisse de fabriquer soi-même des pièces de rechange (notamment pour du matériel agricole) ou d'imprimer ses propres plats, posera des questions d'ordre juridique (sur la propriété intellectuelle, la garantie de la qualité des pièces imprimées, la responsabilité en cas de défaillance), voire d'ordre public (intoxication alimentaire, contrefaçons de pièces d'équipements agricoles, faux médicaments, fabrication d'armes, etc.).

Pour la fabrication additive d'objets comme pour l'impression alimentaire, des avancées technologiques significatives se profilent. Parmi elles, l'intelligence artificielle facilitera et optimisera le processus d'impression : surveillance de la qualité, corrections automatisées en cours d'impression, suggestion des paramètres optimaux, etc. De même, l'essor de l'impression 4D, consistant à ajouter une dimension temporelle au produit imprimé en 3D, dont les propriétés se modifient en réponse à des stimuli externes (température, lumière, pH, etc.), entrouvre la voie à de nouvelles applications : modification de la forme pour faciliter le stockage ou l'emballage, changement des propriétés des aliments (saveur, composition nutritionnelle) lors de leur consommation, allongement de la durée de conservation, etc. Quarante ans après le premier brevet déposé, l'impression 3D poursuit son développement et présente, aujourd'hui encore, les potentialités d'une technologie de rupture plus que jamais objet de recherches et d'innovations.

Jérôme Lerbourg

Centre d'études et de prospective

14. Lu G. et al., 2023, « Global trends in research of pain – gut-microbiota relationship and how nutrition can modulate this link », *Nutrients*, n° 15.

15. Bidaud F., 2021, *La « viande in vitro » : cultiver des cellules musculaires à destination alimentaire*, *Analyse*, n° 164, Centre d'études et de prospective.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire
Secrétariat Général

Service de la statistique et de la prospective
Centre d'études et de prospective
3 rue Barbet de Jouy
75349 PARIS 07 SP
Sites Internet : www.agreste.agriculture.gouv.fr
www.agriculture.gouv.fr

Directeur de la publication : Vincent Marcus

Rédacteur en chef : Bruno Héralult
Mel : bruno.herault@agriculture.gouv.fr
Tél. : 01 49 55 85 75
Composition : DESK (www.desk53.com.fr)
Dépôt légal : À parution © 2024