



La "viande *in vitro*" : cultiver des cellules musculaires à destination alimentaire

Analyse de la trajectoire de la "viande *in vitro*", de ses origines dans les utopies alimentaires jusqu'aux premières mises en marché, en passant par les débats sur l'alimentation et la recherche fondamentale et appliquée.

Mots-clés : alimentation, élevage, innovation, substituts, viande

Auteur : Florent Bidaud

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Centre d'études et de prospective, 3, rue Barbet de Jouy, 75 349 Paris Cedex 07 SP

e-mail de l'auteur correspondant : florent.bidaud@agriculture.gouv.fr

Depuis plusieurs années, des entreprises cultivent des cellules animales pour produire un analogue de viande associé à des promesses concernant la santé des consommateurs, la protection de l'environnement et des animaux. Mais qu'en est-il réellement ? Cet article est la reproduction d'une note sur ce sujet du Centre d'études et de prospective du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, parue en mai 2021¹.

Résumé :

Depuis une vingtaine d'années, des chercheurs essaient de produire, en laboratoire, des cultures de cellules animales pour la consommation alimentaire. La "viande *in vitro*" est présentée comme une innovation disruptive répondant aux différents défis attachés à l'élevage. D'où vient ce projet et par qui est-il promu ? Quels sont les obstacles techniques au passage à l'échelle industrielle, les stratégies de recherche, et les enjeux de mise sur le marché ? Cette note apporte des éléments de réponse et fait le point sur la culture de cellules animales à destination de l'alimentation humaine. La première partie revient sur la succession des projets de remplacement des produits de l'élevage par des protéines alternatives. La deuxième montre comment la *food tech* s'est saisie du projet de "viande *in vitro*", et en souligne les limites techniques actuelles. Enfin, la dernière aborde les défis de sa commercialisation et de son intégration dans l'offre alimentaire

Abstract:

For the past 20 years, researchers have been trying to produce, in the laboratory, cultures of animal cells for food consumption. "In vitro meat" is branded as a disruptive innovation addressing the problems of animal farming. Where does it come from and who promotes this project? What are the technical obstacles to industrial scale-up, the research strategies, and the challenges of bringing to market? This note provides some answers and takes stock of the situation of animal cells cultures for human consumption. The first section reviews the history of projects to replace livestock products with alternative proteins. The second shows how food tech took on the "in vitro meat" project, and underlines its current technical limits. Finally, the last section addresses the challenges of its marketing and integration into the food supply.

¹ Analyse n°164, [La « viande *in vitro* » : cultiver des cellules musculaires à destination alimentaire](#), CEP, mai 2021.

I. INTRODUCTION

Depuis une trentaine d'années, chercheurs et entrepreneurs évoquent la possibilité de réaliser des steaks artificiels. De nombreuses alternatives à base de protéagineux et de légumineuses ont été développées, et ont connu un certain succès, au-delà des marchés de niche traditionnels (Choudhury *et al.*, 2020). Plus récemment, l'arrivée de produits alimentaires issus de la culture *in vitro* de cellules animales a été très médiatisée (Chriki *et al.*, 2020). Le procédé est inspiré de l'ingénierie tissulaire et des techniques médicales de régénération des organes. Il consiste à prélever des cellules souches sur un animal, à les faire proliférer dans un milieu nutritif composé de protéines, d'acides aminés, d'hormones et autres facteurs de croissance, puis à les pousser à se différencier en cellules musculaires et à s'arrimer à des micro-suppôts ou à des "échafaudages" pour, enfin, former des amas de cellules ou des fibres (Figure 1).

Fin 2020, la société américaine Just a reçu l'agrément des autorités de Singapour pour commercialiser une pâte de cellules de poulet, vendue dans un unique restaurant, en mélange avec des protéines végétales sous forme de bouchées (*chicken bites*). Différentes *startups* annoncent une production de masse d'ici cinq à dix ans, sur le créneau de la viande hachée. À plus long terme, d'autres ciblent la fabrication de "morceaux" entiers complexes, imbriquant muscle, gras, tissus conjonctifs, etc. Ainsi, en février 2021, Aleph Farms annonce avoir réussi à reproduire du faux-filet grâce à un procédé d'impression 3-D de cellules (*bioprinting*).

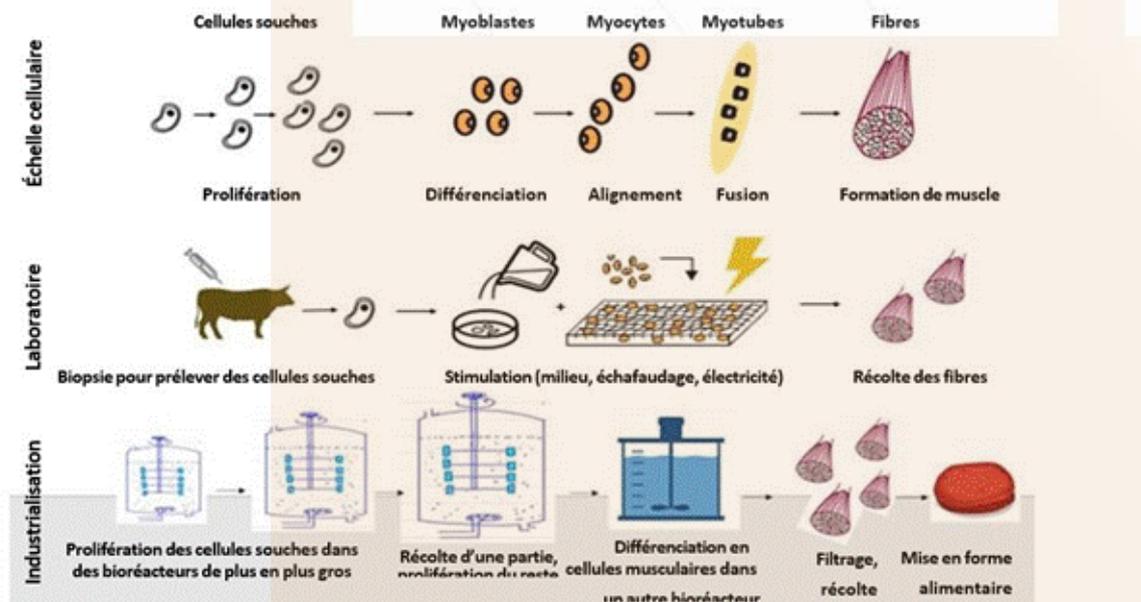
Ces prototypes se démarquent des autres "protéines alternatives" déjà sur le marché, comme les "burgers" végétariens. En effet, il ne s'agit plus seulement de

reproduire le profil nutritionnel des produits de l'élevage, voire leur texture et leurs qualités organoleptiques. Manipulant les blocs élémentaires de la chair animale, ces entrepreneurs considèrent produire plus qu'un substitut ou un analogue de la "vraie" viande. Selon eux, ces projets de "viande *in vitro*"² permettraient de résoudre tout un ensemble de problèmes liés aux modes d'élevage intensifs et à la consommation de produits carnés : émissions de gaz à effet de serre, bien-être animal, risques sanitaires et propagation des zoonoses, etc.

Une telle innovation accompagnerait aussi la transition nutritionnelle des "pays émergents" vers un régime plus carné. Ainsi, à partir d'une seule biopsie, la prolifération exponentielle des cellules permettrait en théorie de produire l'équivalent de la consommation annuelle mondiale de viande (Bartholet, 2010, Melzener *et al.*, 2020). Pour certains, reproduire la viande en laboratoire permettrait même de défendre, dans les pays occidentaux, une norme de commensalité mise à mal par la conflictualité croissante autour des produits de l'élevage, la montée des "alimentations particulières" (Fisher, 2013) et la diffusion du véganisme.

Cette note fait le point sur la culture de cellules animales à destination de l'alimentation humaine. La première partie revient sur la succession des projets de remplacement des produits de l'élevage par des protéines alternatives. La deuxième montre comment la *food tech* s'est saisie du projet de "viande *in vitro*", et en souligne les limites techniques actuelles. Enfin, la dernière aborde les défis de sa commercialisation et de son intégration dans l'offre alimentaire.

Figure 1 : Les trois échelles d'obtention de la "viande *in vitro*" (cellulaire, banc d'essai, industrielle)



Commentaire : pour l'échelle industrielle, le schéma présente une hypothèse avec passages entre différents bioréacteurs (Specht *et al.*, 2020). D'autres approches visent un processus moins perturbant pour les cellules, plus facile à industrialiser (prolifération/différenciation en une étape unique) (Bodiou *et al.*, 2020). Source : auteur

² Si d'autres terminologies tendent à se diffuser à l'échelle internationale, comme « viande cultivée » (« *cultured meat* »), le terme de « viande *in vitro* » reste couramment utilisé dans le débat public français.

II. REMPLACER LES PRODUITS DE L'ÉLEVAGE PAR DES "PROTEINES ALTERNATIVES"

Le dispositif actuel de culture *in vitro* (cellules-milieu-environnement contrôlé) est connu de longue date. Dès les années 1940, les techniques adéquates sont diffusées mondialement dans les réseaux de la recherche médicale. Jusqu'aux années 1990 et aux développements rapides de l'ingénierie tissulaire en médecine humaine, la production de cellules animales à grande échelle, pour l'alimentation humaine, ne semble toutefois pas faisable, et elle n'est pas envisagée sérieusement.

En revanche, l'idée de remplacer la viande par un équivalent artificiel, supposé être de même qualité nutritionnelle, donne lieu à de nombreuses réalisations plus ou moins abouties. Elle apparaît en marge des débats sur "l'équation alimentaire" et sur les solutions pour faire coïncider la production alimentaire avec les besoins nutritionnels des populations (régulation des naissances, augmentation des rendements, mise en culture de nouvelles terres, ajustement des rations, etc.). À la fin du XIX^{ème} siècle, utopistes et suffragettes imaginent comment la pilule-repas (*meal-in-a-pill*) permettrait de défaire le nœud d'injustices liant la famine, la pauvreté et la domination capitaliste, voire patriarcale. La "viande artificielle" devient alors un lieu commun des prophéties sur l'alimentation de demain (Churchill, 1931). Après la Seconde Guerre mondiale, cette topique humanitariste est détournée par la science-fiction, qui en livre une version pessimiste en l'associant au triomphe du marketing, à l'industrialisation et à l'exploitation du vivant (Kornbluth et Pohl, 1952).

Cet imaginaire est nourri par les progrès en chimie et en biologie, mais aussi par des applications envisagées dans le domaine alimentaire. Limité à des niches, le projet de remplacer les produits de l'élevage est porté par des chercheurs liés, dans un premier temps, aux sectes végétariennes (comme les produits des frères Kellogg vers 1895), puis, dans un deuxième temps, à la contre-culture hippie ou au secteur militaro-industriel, soucieux d'assurer la continuité de l'alimentation en période de guerre. On parle alors de substituts, d'analogues ou d'ersatz.

À la fin du XX^{ème} siècle, deux ensembles de tendances de fond convergent et renouvellent les termes du débat, impliquant différentes dimensions et échelles de l'acte alimentaire : nutrition, éthique, politique, environnement (Fourmier, Lepiller, 2019). La viande est devenue centrale dans les régimes. Dans les pays occidentaux, elle tient une place importante dans la ration à partir des années 1950-1960, et le développement de l'élevage industriel permet une consommation de masse à bas prix. Plus récemment, elle se développe très rapidement dans tous les autres continents. De plus, le rapport des mangeurs aux aliments évolue, la nourriture étant de plus en plus réduite à un apport de protéines et de nutriments.

Simultanément, cette centralité de la viande devient problématique, à la croisée de plusieurs défis : conséquences nutritionnelles et sanitaires de la consommation "excessive" de certaines viandes, impacts environnementaux de l'élevage (émissions de gaz à effet de serre et contribution au changement climatique, déforestation importée), sensibilité au bien-être et aux souffrances des animaux, etc. Ainsi, dans les années 2000, les débats sur l'équation alimentaire reviennent, l'enjeu étant de "nourrir le monde à l'horizon 2050", sous un ensemble de contraintes renouvelées.

Dans ce contexte, la simple qualité de "protéine" est de plus en plus mise en avant commercialement, en proposant des alternatives à la viande. Certains produits résultent de la transformation de matières premières végétales : soja, pois, algues dans une moindre mesure. C'est le cas, dans les années 2010, des "burgers" d'Impossible Foods ou Beyond Meat, commercialisés par des chaînes de *fast-food* ou par la grande distribution, parfois en les positionnant dans les rayons viandes. D'autres passent par l'utilisation de levures génétiquement modifiées, comme les combinaisons de protéines ou "laits" produits par Clara Foods et Perfect Day. Enfin, la démarche de remplacement "à partir de composés purs" (This, 2016) (plutôt que d'ingrédients tirés de tissus animaux et végétaux) est réactivée par des approches s'apparentant à la cuisine moléculaire, et par des courants s'inspirant du *do-it-yourself* et de la formulation en alimentation animale (Widdicombe, 2014).

La "viande *in vitro*" s'inscrit dans cet espace des protéines alternatives, au tournant des années 2000, avec la popularisation des techniques d'ingénierie tissulaire. Pour ses premières apparitions hors laboratoire, à l'instar des essais sur un explant de poisson dans le programme financé par la NASA (Benjaminson *et al.*, 2002), elle reste aux yeux de nombre d'observateurs de l'ordre de l'incroyable. Menés par des chercheurs excentrés, sinon marginaux, ces travaux sont considérés comme insolites et font réagir. La première dégustation de "chair" de grenouille cultivée, par les artistes Catts et Zurr, à Nantes en 2003, relaie ainsi un discours critique sur les bio-technologies (Catts, Zurr, 2013). Les pionniers doivent alors, à grand peine, déconstruire l'image de science-fiction, tout en se positionnant face aux problèmes publics du moment. Appartenant à un milieu professionnel marqué par les débats sur les OGM et les cellules souches, ils anticipent aussi les questions d'acceptation et de mise sur le marché, et fixent d'emblée un "cahier des charges" formulé dès le premier brevet déposé par Van Eelen (<https://patents.google.com/patent/WO1999031222A1/en>) en 1997 : le procédé et le produit final ne devront pas poser les mêmes problèmes que la viande d'élevage industriel, ni en faire apparaître de nouveaux.

III. LA FOOD TECH FACE AUX DEFIS TECHNIQUES DE LA "VIANDE IN VITRO"

Le passage à l'économie des startups et du capital-risque a lieu au début des années 2010. Après avoir végété pendant une dizaine d'années dans le monde universitaire, le projet de "viande *in vitro*" trouve un écho du côté de la Silicon Valley, auprès d'acteurs partagés entre optimisme

technologique et catastrophisme écologique. M. Post, professeur de physiologie impliqué dans le projet néerlandais, reçoit un financement de S. Brin, co-fondateur de Google. En 2013, à Londres, a lieu la [dégustation](#)

publique du premier "burger" issu de cellules cultivées in vitro, au coût estimé de 250 000 euros.

La "viande *in vitro*" se coule alors dans la forme et la chronologie des projets disruptifs de la *food tech*. Ce terme désigne l'ensemble des startups du domaine alimentaire proposant des innovations (produits, distribution, etc.), en tirant parti des technologies de l'information et des biotechnologies. Le "burger" de 2013 est positionné comme une démonstration de faisabilité technique (*proof of concept*). Par la suite, de nombreuses startups, nouvelles pour la plupart, font leurs premiers pas en incubateurs ou en recevant des financements importants lors de tours de table de capital-risque.

Les entreprises impliquées sont majoritairement installées en Californie, puis aux Pays-Bas et en Israël avec, pour ce pays, des accords commerciaux passés avec la Chine en matière de *clean tech* (innovations tournées vers la réduction de l'empreinte écologique). En France, on compte au moins trois projets liés à la "viande *in vitro*" (Gourmey pour la production d'un équivalent de foie gras, Vitalmeat avec des travaux sur les cellules de poulet, CoreBiogenesis pour la bioproduction de facteurs de croissance, nécessaires pour réguler le cycle de vie des cellules) (Pons, 2020). Fin 2019, à l'échelle mondiale, 32 initiatives, à différents états d'avancement, sont soutenues par le secteur du capital-risque, pour un montant de 166 millions d'euros (Choudury *et al.*, 2020).

L'effectif total approche les 80 entreprises et il augmente régulièrement (Good Food Institute, 2020). La présence des investisseurs asiatiques est souvent relevée, ainsi que l'apport du groupe pharmaceutique Merck à Mosa Meats, ou celui des multinationales de la viande Tyson et Cargill, en janvier 2020, à une levée de fonds record de 161 millions de dollars par Memphis Meats destinée à la réalisation d'un site "pilote" de production. Quand ils existent, les partenariats avec des organismes de recherche publique sont rarement mis en avant³. Les travaux visent à imiter la chair de différents animaux : bœuf, poulet, poisson, crustacés. Certains adoptent une orientation premium (wagyu, thon rouge, foie gras), mais la plupart se positionnent sur le créneau des "viandes hachées", faiblement structurées.

Parallèlement à la recherche de solutions techniques et à la compétition sur les procédés, ces acteurs mettent en forme un "récit" de la "viande *in vitro*" et coopèrent, par

exemple, à des conférences présentant chaque année la portée des travaux menés, les étapes à venir, les écueils, etc. Plusieurs livres formulent les enjeux du projet (notamment, Shapiro, 2018) et donnent à voir une tendance, un mouvement d'ensemble (Stephens *et al.*, 2020). De plus, des ONG liées à la mouvance végane (New Harvest, The Good Food Institute), s'entourent de chercheurs en psychologie ou en marketing pour étudier "l'acceptabilité sociale" et les modalités de présentation de l'innovation aux consommateurs. Les considérations d'opinion publique et de stratégie déterminent ainsi la succession des désignations : viande "cultivée", "propre", "*cell-based*", etc. Au-delà des variations, les termes choisis postulent tous que le produit possède les qualités de la viande d'élevage, sans en avoir les inconvénients.

S'agissant des procédés, les défis sont nombreux et les progrès difficiles à mesurer (encadré 1). En la matière, la biologie fonctionne par tâtonnements (Knorr-Cetina, 1996). En effet, de nombreux essais sont nécessaires pour mimer les processus naturels (Post et Hocquette, 2017), puis substituer aux éléments trop chers, impropres à la consommation humaine, gênants sur le plan éthique, etc., des équivalents vertueux, et enfin les optimiser. Les difficultés sont d'autant plus grandes que la formation du muscle *in vivo* implique de nombreux processus biologiques. Cette dimension laborieuse est rarement évoquée, sinon pour souligner l'apport d'outils automatisés (modélisation métabolique et bio-informatique), facteurs de maîtrise et d'accélération.

Le secteur se fournit auprès des firmes pharmaceutiques, qui produisent des intrants compatibles avec la médecine humaine, ayant des exigences sanitaires et des prix très élevés. Récemment, la manne des financements a suscité l'apparition de startups de deuxième génération, fournissant des services aux startups tournées vers la production, ce qui pourrait contribuer à diminuer les coûts.

Au total, un certain flou entoure les technologies choisies et les résultats obtenus à l'échelle préindustrielle, situation typique dans un univers tendu entre exigences de disruption, principe de transparence et secret des procédés (Guthman et Biltekoff, 2020). Des informations plus détaillées devraient progressivement être disponibles, à la discrétion des startups, apportant les points de repère qui manquent à l'heure actuelle.

IV. UNE ARRIVEE IMMINENTE SUR LE MARCHE, MAIS ENCORE BEAUCOUP DE QUESTIONS

Certains acteurs veulent voir dans la "viande *in vitro*" un équivalent conforme aux caractéristiques des hachés, qui représentent 50% du marché mondial de la viande. Cette nouvelle production viendrait se substituer à l'élevage industriel, devenu alors "obsolète". Plusieurs précédents historiques sont convoqués pour montrer qu'un changement rapide, de grande ampleur, est possible : déclin de l'industrie baleinière avec la mise au point du kérosène, de la traction par les chevaux avec l'automobile de grande série, etc.

Mais, pour qu'une telle trajectoire s'affirme, des conditions doivent être réunies : équivalence des produits (en termes de propriétés technico-fonctionnelles), niveau des prix, utilisation facile, confiance des mangeurs au moins équivalente à celle accordée au référent naturel (Burton, 2019). Au-delà des difficultés techniques relatives à la mise au point des produits, de nombreuses incertitudes restent à lever avant d'envisager une commercialisation à grande échelle. Plusieurs paramètres, en particulier les choix de régulation publique, conditionneront cette diffusion,

³ Mosa Meats est cependant lié à l'université de Maastricht, et Aleph Farms au Technion, l'institut israélien de technologie.

aboutissant potentiellement à des situations contrastées à travers le monde.

La commercialisation est avant tout soumise à l'obtention d'autorisations de mise sur le marché. En Europe, dans le cadre du règlement *Novel Food*, les dossiers présentés devront entre autres lever les doutes sur l'utilisation d'hormones de synthèse ou d'OGM, et "démontrer que le matériel utilisé (plastique, biomatériaux), le milieu de culture avec ses nombreux composants, les cellules animales utilisées, etc., ne présentent aucun danger" (Hocquette *et al.*, 2020). La protection de la santé publique constitue une exigence préalable. À défaut d'apporter ces garanties, la "viande *in vitro*" ne pourra pas être produite ou commercialisée sur les marchés européens.

Une deuxième incertitude concerne le droit d'appeler le produit de remplacement "viande". La législation américaine semble se diriger vers une telle reconnaissance, sous certaines conditions, mais il pourrait en aller autrement en Europe, où les réglementations requièrent de démontrer l'équivalence nutritionnelle, et impliquent des évaluations sur la base des habitudes et coutumes (Seehafer et Bartels 2019). Parmi les éléments attendus d'un produit carné, le contenu protéique des cellules cultivées (par exemple en acides aminés indispensables) n'est pas encore connu, ni leur teneur en fer ou en vitamine B12 (Fraeye *et al.*, 2020). La texturation du produit final représente un autre défi,

rarement évoqué. Pour l'instant, on obtient plus un amas de cellules, mis en forme de pâte, qu'un muscle texturé.

Seul le projet d'Aleph Farms vise la production directe d'un morceau entier, du type steak ou aiguillette, alors que d'autres cherchent plutôt à améliorer la palatabilité du produit en co-cultivant différents types de cellules, notamment des adipocytes en plus des myocytes. Rappelons qu'en France la loi relative à la transparence de l'information sur les produits agricoles et alimentaires interdit toute dénomination animale pour des produits à base de composants végétaux. La "viande *in vitro*" répondra donc aux mêmes restrictions de dénominations que les générations précédentes de protéines alternatives, quand elles utilisent des dénominations animales, telles que par exemple "lait", "viande" ou "steak".

En outre, les règles sur l'information du consommateur pèseront, en particulier pour démontrer les qualités accessoires. Par exemple, si les premières analyses de cycle de vie annonçaient une réduction drastique de l'empreinte écologique, le couplage avec des énergies renouvelables apparaît désormais nécessaire pour atteindre ces performances (Tuomisto, 2019). De même, si des progrès ont été réalisés en matière de formulation, l'utilisation de sérum fœtal bovin, comme dans le cas des chicken bites commercialisées à Singapour, est un obstacle pour un positionnement animal free.

Encadré 1 - Les défis techniques de la "viande *in vitro*"

Les défis concernent les quatre composantes du dispositif de culture.

• Les lignées cellulaires

L'origine des cellules souches détermine notamment leur capacité à proliférer. Le nombre de divisions est naturellement contraint (limite de Hayflick). Pour aller au-delà de 50 générations et tirer parti du potentiel de croissance exponentielle des cellules, il faudrait adapter aux animaux d'élevage les connaissances obtenues sur les animaux-modèles utilisés en laboratoire, et mettre au point des lignées "immortalisées", par manipulation génétique. Une telle option s'appuyant sur le principe des OGM est controversée, mais tentante pour contourner certaines impasses techniques et gagner la "course au marché".

• Le milieu de culture

Utilisé classiquement dans les milieux de culture, le sérum fœtal bovin apporte hormones et autres facteurs de croissance nécessaires à la prolifération et la différenciation des cellules. Il représenterait plus de 90% des coûts de production, qui doivent donc être réduits. De plus, se posent des problèmes éthiques pour obtenir ce sérum (il faut abattre des vaches gestantes) et de régularité de composition. Si l'élaboration de milieux ne recourant pas à ce sérum semble possible, les publications scientifiques sur le sujet restent rares. Rappelons toutefois que l'utilisation d'hormones et de facteurs de croissance est interdite en Europe pour l'élevage.

• Les micro-suppports ou échafaudages

À l'étape de différenciation des cellules souches, le développement des cultures en 3D, par opposition à celles en 2D sur boîtes de Pétri, soulève des questions de choix des matériaux (enrobages, topographies ou caractères hydrophiles conditionnant l'adhérence des cellules), de choix des techniques de séparation avec les cellules lors de la « récolte » et de compatibilité avec la consommation alimentaire.

• Les bioréacteurs

*La montée en échelle, au-delà des petits formats couramment utilisés en laboratoire, pose des problèmes de brassage et d'oxygénation dans les incubateurs (ou, à défaut, de nécrose des cellules), qui renvoient à la mécanique des fluides. Différents schémas sont imaginables, en lien avec le type de produit final visé (plus ou moins structuré). Dans une étude théorique de coûts réalisée par le Good Food Institute (Specht, 2020), la prolifération des cellules se fait avec un changement de bioréacteur tous les 10 jours, jusqu'à une cuve de 20 000 litres. À cette étape, de 50 à 90 % des cellules sont récoltés pour la différenciation en fibres musculaires. La partie non transférée continue de se multiplier, ces "trains de culture" successifs permettant de tirer parti d'une croissance exponentielle pour obtenir jusqu'à 19 tonnes de matière à partir d'un inoculum de 2,5 ml. Selon les déclarations de l'entreprise Just, la base des chicken bites commercialisées à Singapour est cultivée dans des bioréacteurs de 1 200 litres. Soulignons cependant que dans le domaine de la thérapie cellulaire allogénique, en médecine humaine, le passage (en cours) des cultures vers des bioréacteurs d'une capacité de 35 à 50 litres – soit des volumes bien inférieurs à ceux envisagés pour la production industrielle de "viande *in vitro*" – est décrit comme difficile par certaines publications (Allan *et al.*, 2019).*

Une autre incertitude porte sur la mise au point d'un modèle économique viable. Le faible niveau de texturation positionne les produits sur le créneau de la grande consommation, où le prix est le déterminant principal de la décision d'achat. Le scénario de remplacement de la viande naturelle n'a alors que peu de chances d'advenir si la parité n'est pas approchée. On peut cependant aussi envisager un positionnement de niche, avec des produits marketés en direction de jeunes consommateurs technophiles, pour qui la viande est de plus en plus réduite à un apport de protéines. Des scénarios de co-formulation de produits hybrides *in vitro*-protéines végétales sont également très probables.

Qui plus est, la trajectoire et le succès des produits dépendront de considérations sur le modèle social associé aux cultures *in vitro*. Les critiques de la fuite en avant technologique se multiplient, mettant en garde contre les

risques sanitaires (Muraille, 2019) ou défendant l'élevage et la gastronomie traditionnels (voir par exemple, Luneau, 2020). Le passage d'une logique de controverse à une situation de conflit ouvert (Chateauraynaud *et al.*, 2010) pourrait avoir un effet dissuasif sur le développement de ces produits et en limiter fortement la place dans les systèmes alimentaires. En France, dans le cadre des débats sur la loi Climat et résilience, un article relatif à l'interdiction de la "viande cellulaire" dans les cantines scolaires⁴ a ainsi été adopté lors de la première lecture du texte à l'Assemblée nationale. La survenue d'accidents de production, et plus largement la documentation d'effets inattendus, sur les marchés où elle sera autorisée, comme aujourd'hui à Singapour, pourraient précipiter la formation d'un front d'opposition à ces biotechnologies, comme dans le cas des OGM.

V. CONCLUSION

Un certain nombre d'acteurs ambitionnent de remplacer des produits de l'élevage par des substances obtenues en environnement contrôlé. Les premières réalisations de "viande artificielle" ont frappé les esprits, attirant des financements conséquents. Même si les techniques actuellement utilisées pourraient bénéficier des avancées médicales en matière d'ingénierie tissulaire, des incertitudes considérables subsistent cependant, sur les procédés comme sur les produits : utilisation des hormones

de croissance dans les milieux de culture, empreinte écologique, propriétés nutritionnelles, coûts de revient, intérêt réel des consommateurs, etc. Outre ces incertitudes technologiques, les enjeux de société sont très importants. À ce titre, les prises de positions du ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation comme des parlementaires français montrent que les pouvoirs publics se sont déjà saisis de ces questions.

Références

- Allan S.J., De Bank P.A., Ellis M.J. (2019). Bioprocess Design Considerations for Cultured Meat Production with a Focus on the Expansion Bioreactor. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 44.
- Bartholet J. (2011). Inside the meat lab. *Scientific American*, 304, 65-69, Erratum, 305, 10.
- Benjaminson M., Gilchrist J.A., Lorenz M. (2002). In vitro edible muscle protein production system (MPPS): stage 1, fish. *Acta Astronautica*, 51, 879-889.
- Bodiou V., Moutsatsou P., Post M. (2020). Micro- carriers for Upscaling Cultured Meat Production. *Frontiers in Nutrition*, 7:10.
- Catts O., Zurr I. (2013). Disembodied livestock: the promise of a semi-living utopia. *Parallax*, 19, 101-113.
- Chateauraynaud F., Bernard de Raymond A., Hermitte M.A., Tétart G. (2010). Les OGM entre régulation économique et critique radicale. Rapport du programme OBSOGM, ANR OGM, Paris, GSPR, novembre.
- Choudhury D., Tseng T.W., Swartz E. (2020). The Business of Cultured Meat. *Trends in Biotechnology*, 38, 573-577.
- Chriki S., Ellies-Oury M.P., Hocquette J.F. (2020a). Viande in vitro. Intérêts, enjeux et perception des consommateurs. *Techniques de l'Ingénieur*, F6520 V1.
- Chriki S., Ellies-Oury M.P., Fournier D., Liu J., Hocquette J.F. (2020b). Analysis of scientific and press articles related to cultured meat for a better understanding of its perception. *Frontiers in Psychology Eating Behavior*, 11, 1845.
- Churchill W. (1931). Fifty years hence. *Popular mechanics*.
- Fischler C. (dir.), (2013). Les alimentations particulières, Mangerons-nous encore ensemble demain ?. Paris, Odile Jacob, 272p.
- Fournier T., Lepiller O. (2019). Se nourrir de promesses. Enjeux et critiques de l'introduction de deux innovations dans le domaine alimentaire : test nutri-génétique et viande in vitro. *Socio*, 12. <https://journals.openedition.org/socio/4529>
- Fraeye I., Kratka M., Vandeburgh H., Thorrez L. (2020). Sensorial and Nutritional Aspects of Cultured Meat in Comparison to Traditional Meat: Much to Be Inferred. *Frontiers in Nutrition*, 7, 35.
- Good Food Institute, 2020, 2019 State industry report. Cultivated meat. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/01/INN-CM-SOTIR-2020-0512.pdf>
- Guthman J., Biltkoff C. (2020). Magical disruption? Alternative protein and the promise of de-materialization. *Environment and Planning E: Nature and Space*. October 2020. doi:10.1177/2514848620963125.
- Knorr-Cetina K. (1996). Le "souci de soi" ou les "tâtonnements" : ethnographie de l'empirie dans deux disciplines scientifiques. *Sociologie du travail*, 38, 311-330.
- Kornbluth P., Pohl F. (1952). *The space merchants*. Ballantine.
- Luneau G. (2020). *Steak barbare – Hold-up végan sur l'assiette*. Éditions de l'Aube, Fondation Jean Jaurès, Arles, 372 p
- Melzener L., Verzijden K., Buijs A.J., Post M.J., FlacK J.E. (2021). Cultured beef: from small biopsy to substantial quantity. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 101, 7-14.
- Muraille E. (2019). La "viande cultivée" en laboratoire pose plus de problèmes qu'elle n'en résout. *The Conversation*, 8 novembre. <https://theconversation.com/la-viande-cultivee-en-laboratoire-pose-plus-de-problemes-quelle-nen-resout-126662>

⁴ Voir la page : https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/dossiers/lutte_contre_le_dereglement_climatique ; voir aussi la

tribune de l'association Agriculture cellulaire française (Rolland, 2021).

- Peskett M. (2021). Aleph Farms' 3D bioprinting delivers world's first cultivated ribeye steak. Food and farming technology. <https://www.foodandfarmingtechnology.com/news/food-manufacture/3d-bioprinting-delivers-worlds-first-cultivated-ribeye-steak.html>
- Pons H. (2020). En France, la viande artificielle se tient encore loin de nos assiettes. Maddynews, 15 août 2021. <https://www.maddynews.com/2021/08/15/en-france-la-viande-artificielle-encore-loin-de-nos-assiettes/>
- Post M. and Hocquette J-F. 2017. New sources of animal proteins: cultured meat. In: New aspects of meat quality – from genes to ethics Ed. Purslow, P. Woodhead publishing Limited. pp. 425-440.
- Rolland N., 2021, Agriculture : la viande cultivée se voit déjà privée de cantine. Le Monde, 21 avril, https://www.lemonde.fr/idees/article/2021/04/21/agriculture-la-viande-cultivee-se-voit-deja-privee-de-cantine_6077493_3232.html
- Seehafer A., Bartels M. (2019). Meat 2.0. The regulatory environment of plant-based and cultured meat. European Food and Feed Law Review, 14, 323-331.
- Shapiro P. (2018). Clean meat. How growing meat without animals will revolutionize dinner and the world, Gallery books.
- Specht L. (2020). An analysis of culture medium costs and production volumes for cultivated meat. The Good Food Institute.
- Stephens N., Sexton A.E., Driessen C. (2020). Making sense of making meat: moments in the first 20 years of tissue engineering muscle to make food. Frontiers in Sustainable Food Systems, 3, 45.
- This H. (2016). What can "artificial meat" be? Note by note cooking offers a variety of answers. Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France (N3AF), 6.
- Tuomisto H. (2019). Vertical farming and cultured meat: immature technologies for urgent problems. One Earth, 1, 275-277.
- Widdicombe L., 2014. The end of food. Has a tech entrepreneur come up with a product to replace our meals?. New Yorker. <https://www.newyorker.com/magazine/2014/05/12/the-end-of-food>