

Séance publique du 7 novembre 2022

Insectes, viandes de culture, foie gras cellulaire, algues, laits artificiels... à notre menu demain ? Cauchemar ou espoir d'un nouveau monde d'où la faim aura disparu.

Pierre FEILLET

Membre de l'Académie d'agriculture et de l'Académie des technologies

MOTS CLÉS

Transition alimentaire, protéines alternatives, protéines végétales, analogues végétaux de viande, algues, insectes, viandes de cultures, fermentation de précision, éthique de l'alimentation.

RÉSUMÉ

Les industries manufacturières vont-elles remplacer la Terre nourricière ? Les ingénieurs et les chimistes vont-ils se substituer aux agriculteurs ? De nombreux facteurs poussent à l'apparition de nouvelles manières de produire des aliments et de se nourrir : l'évolution de la démographie, la diminution du nombre de paysans, l'impact d'une agriculture productiviste sur l'environnement, le changement climatique, l'insuffisante disponibilité de sols fertiles, la peur de manquer de protéines pour nourrir l'humanité, un nouveau regard sur le bien-être des animaux, la recherche d'une alimentation plus « végétalisée », les avancées des sciences et des technologies. Forts de cette analyse, des scientifiques, des entrepreneurs et des investisseurs sont nombreux à croire en l'avenir des hachis végétaux substitués de la viande, des farines protéinées de larves d'insectes, des viandes fabriquées par culture de cellules souches, des laits et fromages artificiels obtenus à partir de protéines de microorganismes génétiquement modifiés. Des milliards de dollars sont investis dans des start-up dont les « nouveaux aliments » commencent à apparaître sur tous les continents.

La Terre nourricière avec ses champs, ses pâturages et ses étables va-t-elle être remplacée par des usines où seront synthétisés des romsteaks, des blancs de poulets et du lait ? Sommes-nous en train d'assister à une rupture significative dans les manières de nous alimenter ? La septième transition alimentaire a-t-elle débuté ? Voilà une dizaine d'année que ce débat est ouvert avec l'émergence de nouveaux procédés industriels de fabrication d'aliments : farines protéinées d'insectes, produits animaux obtenus à partir de cellules souches (viandes et poissons cellulaires), protéines de lait et d'œufs produites par des microorganismes génétiquement modifiés issus de la biologie de synthèse (fermentation de précision). Auxquels il faut ajouter les « viandes végétales » (sic) destinés à se substituer aux produits carnés.

L'ambition de cet article est d'apporter quelques données factuelles sur cette industrie alimentaire en cours d'émergence dont le développement pourrait significativement modifier le système alimentaire mondial qui, tel que l'a défini le

professeur Louis Malassis (1994), désigne la manière dont les hommes s'organisent, dans l'espace et dans le temps, pour obtenir et consommer leur nourriture.

Vers une septième transition alimentaire

La *première transition alimentaire* vieille de deux millions d'années a vu notre très lointain ancêtre *Homo habilis* passé progressivement d'un régime végétarien (cueillette) à un régime omnivore, ajoutant à ses menus des insectes, des amphibiens, des reptiles, des poissons et des petits mammifères. Souvent, il doit se contenter des charognes abandonnées par les gros carnivores (Figure 1).

La *deuxième transition* alimentaire date d'environ 500 000 ans. Elle résulte de la maîtrise du feu. La cuisson permet de détruire les substances anti-nutritionnelles de certains végétaux, de faciliter l'assimilation de macronutriments, l'amidon notamment, et de tuer les bactéries pathogènes et les parasites. Les repas pris autour du feu favorisent la socialisation des membres de la tribu.

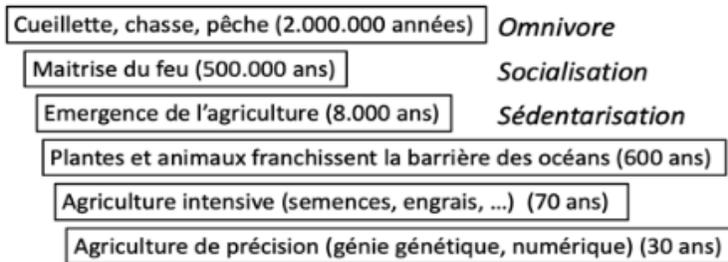


Figure 1 : D'*Homo habilis* à nos jours, six transitions alimentaires

La *troisième transition* apparaît il y a 8 000 ans avec l'émergence de l'agriculture et de l'élevage. Elle permet la sédentarisation des tribus nomades qui partaient à la recherche d'autres territoires, sitôt épuisées les ressources naturelles environnantes. Les « intellectuels », déchargés de la quête du pain quotidien grâce au labeur des paysans, ont désormais le temps de jeter les bases de nouvelles civilisations. Des villages puis des villes se construisent. Les chefs commandent, les prêtres endoctrinent, les soldats protègent, les artisans fabriquent, les paysans nourrissent.

La *quatrième transition* résulte du franchissement par les gènes de la barrière des océans grâce à l'invention des caravelles. Des plantes et des animaux venus de continents lointains prennent place dans les champs et les étables des européens (Tableau 1).

Amériques	Maïs, pomme de terre, patate douce, manioc, tournesol, tomate, haricot, artichaut, citrouille, arachide, papaye, ananas, cacao, poivre.
Afrique	Sorgho, mil, igname, palmier à huile, riz africain, café, melon.
Asie	Riz asiatique, seigle, canne à sucre, vigne, melon, banane, orange, prune, aubergine, oignon.
Europe	Blé, orge, lentille, choux, olive, céleri, laitue.

Tableau 1 - Provenance des principales plantes cultivées (Hamon, 2019)

Les cultures et les élevages se diversifient. Les premiers jalons de l'internationalisation du système alimentaire se mettent en place avec le commerce des épices, du thé et du chocolat. En France, cette transition s'amplifie avec les défrichements des forêts au Moyen-Âge, puis une meilleure maîtrise des travaux des champs au 17^e siècle sous l'impulsion de l'agronome Olivier de Serres. Cependant, les rendements des cultures céréalières restent encore très proches de ceux de la Gaule romaine.

La *cinquième transition* est récente. Elle s'appuie sur les grandes découvertes des savants et ingénieurs du 19^e siècle : Claude Bernard et la physiologie animale, Georges Mendel et ses lois sur l'hérédité, Justus von Liebig et la chimie agricole, Louis Pasteur et la microbiologie, Étienne Lenoir et le moteur thermique, Charles Tellier et le transport réfrigéré. Les rendements agricoles et la production de produits d'origine animale (viande, lait, œufs) font un bond en avant à partir des années 1950 grâce à la sélection d'espèces et de races plus performantes, à la fabrication d'engrais et de produits phytosanitaires par l'industrie chimique, à l'apparition des tracteurs et autres machines agricoles, à une bonne maîtrise de l'irrigation, à l'optimisation des rations alimentaires des animaux et à la formation des agriculteurs. Les résultats sont spectaculaires : entre les années 1950 et 2020, les rendements en blé, en maïs et en sucre de betterave explosent, passant respectivement par hectare de 10 à 75 quintaux (blé), de 20 à 90 quintaux (maïs) et de 4 à 14 tonnes (sucre de betterave) ; la production de lait (les vaches sont quatre fois plus productives) et d'œufs (passant de 120 de 250 œufs par poule et par an) progresse également très fortement.

À la fin du 20^e siècle, l'histoire s'accélère. Depuis une trentaine d'année, la *sixième transition* s'installe avec les progrès de la biologie moléculaire, du numérique et de la nutrition (rôles du microbiote). Le décryptage du code génétique ouvre la voie au franchissement par les gènes de la barrière des espèces ce qui permet aux biologistes d'introduire dans une plante cultivée des propriétés que ne possède pas son espèce. Avec le GPS et l'intelligence artificielle, l'agriculture de précision facilite le travail des agriculteurs et réduit les impacts environnementaux de l'agriculture.

Au début du troisième millénaire, les impacts de ce qu'il n'est pas exagéré de qualifier de « révolution agricole » se mesurent sur la société, la santé des Français et l'environnement. En deux siècles, le temps de travail d'un ouvrier pour acheter un kilo de blé est passé de deux heures à une minute ; le nombre d'agriculteurs et d'ouvriers agricoles a régressé de 10 000 000 en 1945 à 650 000 en 2020. Les Français se nourrissent mieux, ce qui se traduit par un accroissement de la taille des hommes (Figure 2), une plus longue espérance de vie (en synergie avec les progrès de la médecine) et une chute très significative de la contamination biologique des aliments par des agents pathogènes. Par contre, l'obésité et les contaminations par des produits chimiques de synthèse s'accroissent. L'impact sur l'environnement est plus négatif : émissions de gaz à effet de serre (20 à 25% des émissions d'origine humaine), pollution des sols, de l'air et de l'eau (pesticides, nitrates), baisse – restant à mieux quantifier – de la biodiversité, prélèvement d'importantes quantités d'eau pour l'irrigation des cultures. Dans le prolongement de l'agriculture intensive, puis raisonnée, d'autres formes d'agricultures sont mises en œuvre pour

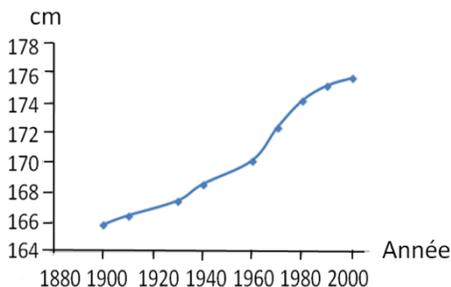


Figure 2 : En France, l'évolution de la taille moyenne des jeunes gens entre 18 et 22 ans témoigne des effets bénéfiques d'une meilleure alimentation

réduire ces impacts négatifs (agroécologie, agriculture biologique, agroforesterie, agriculture de conservation, etc.).

À notre époque, de nombreux facteurs poussent à l'apparition de nouvelles manières de produire des aliments : l'évolution de la démographie (croissance, vieillissement, urbanisation et augmentation du niveau de vie des populations), la diminution du nombre de paysans, l'impact d'une agriculture productiviste sur l'environnement (nous venons d'en faire un rapide inventaire), une fertilité des sols décroissantes et les freins à l'accroissement des surfaces cultivables, la peur de manquer de protéines pour nourrir les hommes, un nouveau regard sur les animaux, leur bien-être, leur sensibilité, voire leur conscience, le mouvement qui en découle, notamment chez les jeunes générations, vers une alimentation plus « végétalisée », les avancées des sciences et des technologies permettant l'émergence de procédés innovants de production des nutriments et de fabrication des aliments.

Forts de cette analyse, des scientifiques, des entrepreneurs et des investisseurs sont de plus en plus nombreux à croire à l'avenir des simili-viandes à bases de protéines végétales (elles sont déjà sur le marché) ainsi que de l'élevage d'insectes et de ce qu'il est convenu d'appeler l'agriculture « cellulaire » (culture de tissus, fermentation de microorganismes) pour produire de nouveaux ingrédients et aliments à forte teneur en protéines destinés, selon les cas, aux animaux ou aux humains. De grands groupes de l'industrie alimentaire sont parties prenantes de ces aventures : Mars, General Mills, Nestlé, Unilever, Danone, ADM notamment. Au point de se demander si les bases d'une *septième transition* alimentaire ne sont pas en train de se poser.

Une demande croissante en protéines

La demande en macronutriments pour assurer une alimentation équilibrée peut se résumer à la formule simplifiée « apports d'énergie = GPL 312 », formule qui peut se comprendre de la manière suivante : 50% de l'énergie nécessaire à notre organisme doit être fournie par des glucides (céréales, tubercules, plantes sucrières), 35% par des lipides (huiles végétales, graisses animales) et 15% par des protéines (produits animaux, céréales, protéagineux).

En France, les deux tiers des protéines consommées sont d'origine animale (viandes, poissons, charcuteries, ovoproduits, produits laitiers), valeur comparable à celles des autres pays occidentaux, alors que les proportions inverses prévalent dans le reste du monde. Cette situation évolue avec une lente diminution de la consommation de viande en Europe et une tendance à la hausse, parfois très marquée, dans les autres régions du monde (Tableau 2). Cette dernière a deux causes principales : l'accroissement de la population (c'est le cas de l'Afrique) ou l'accroissement du niveau de vie (c'est le cas de l'Asie) dans de nombreux pays.

Europe	-2%	Chine	30%
Russie	1%	Asie du Sud-est	39%
Amérique du Nord	14%	Inde	47%
Australie	21%	Moyen orient	87%
Amérique du Sud	25%	Afrique	111%

Tableau 2 : Croissance envisagée (%) de la demande en viandes par région du monde entre 2010 et 2030 (source : FAO)

Contrairement à ce qu’espèrent les climatologues, la part des protéines animales dans la ration alimentaire des humains devrait augmenter au niveau mondial (Figure 3). Cette tendance inquiète car l’élevage contribue à l’effet de serre d’origine humaine à hauteur de 14% et que la production de soja pour nourrir les animaux entraîne une déforestation, notamment de la forêt amazonienne au Brésil. De plus, un excès de consommation de viande rouge (plus de 500 g/personne/semaine pour une partie de la population des pays riches), accroît les risques de cancer. Enfin, les consommateurs-citoyens sont de plus en plus sensibilisés à la maltraitance animale et font pression sur les professionnels du système alimentaire.

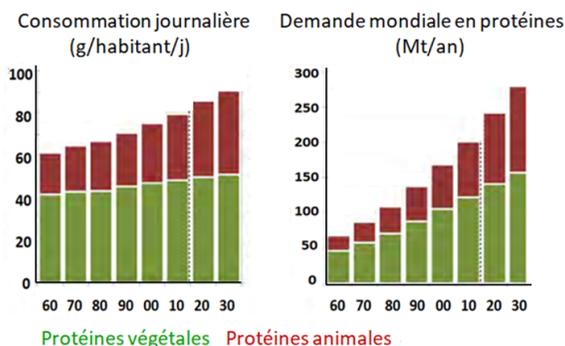


Figure 3 : Évolution comparée de la demande en protéines végétales et animales dans le monde (source : FAO)

Une analyse plus fine de l’origine des protéines alimentaires consommées dans le monde aboutit aux données synthétisées Figure 4. On notera la part importante des protéines contenues dans les herbages et les fourrages dont la totalité est transformée en protéines animales. On notera également qu’une proportion significative des protéines des grains et des graines est destinée à l’alimentation animale avec un faible rapport protéines végétales consommées/protéines animales produites.

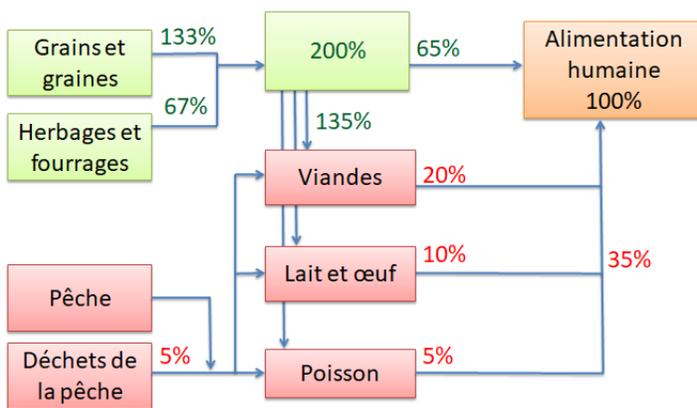


Figure 4 : Source des protéines consommées par les humains en % des protéines consommées (source : Feillet, 2014).

Avec la FAO, les prévisionnistes se demandent si les disponibilités en protéines seront suffisantes pour satisfaire les besoins de l’humanité au cours des prochaines décennies. Ce qui conduit des entrepreneurs à produire des simili-viandes à bases de

protéines végétales ou à rechercher de nouvelles sources de protéines qui offrent des alternatives aux modes de productions actuels.

Les protéines végétales

– Les légumes secs

Pour réduire la consommation de protéines animales au profit des protéines végétales, la proposition la plus simple est de remplacer les produits carnés par des légumes secs (lentilles, pois cassés, haricots blancs...). Cependant, il n'est pas inutile de souligner que si leur teneur en protéines est proche de celle de la viande avant cuisson, il en est différemment dans l'assiette : 100 grammes de lentilles cuites contiennent près de trois fois moins de protéines qu'une quantité équivalente de rôti de bœuf (Tableau 3). D'autre part, leur composition en acides aminés indispensables n'est pas aussi équilibrée que celle de la viande. Néanmoins, manger davantage de légumes secs est une recommandation des nutritionnistes afin de tendre vers une consommation équivalente de protéines animales et de protéines végétales. Il faudra néanmoins longtemps avant d'en mesurer l'impact sur les habitudes alimentaires des Français puisque cette consommation est encore très marginale : 1,7 kg/personne/an. Ce qui correspond à un apport annuel en protéines de 400 grammes pour un besoin estimé d'environ 30 kg.

	Plat de lentilles	Roti de bœuf
Avant cuisson	24	23
Après cuisson	9	25

Tableau 3 : Teneur en protéines (%) des lentilles et d'un rôti de bœuf avant et après cuisson (source : banque de données Ciqual)

– Les hachés végétaux

Pour optimiser l'accès aux protéines présentes dans les protéagineux¹, notamment celles de soja, des industriels se sont employés depuis les années 1970 à les extraire puis à les assembler avec d'autres substances alimentaires pour fabriquer des simili-viandes.

Le procédé de fabrication de ces nouveaux aliments est schématisé figure 5 : broyage et fractionnement des graines, isolement des protéines (farines à 90% de protéines), texturation à l'aide d'un cuiseur-extrudeur (une machine permettant de chauffer les protéines tout en les cisailant de manière à les transformer en fibres) pour conférer à ces dernières de nouvelles propriétés fonctionnelles, apport de multiples ingrédients (agents de textures, arômes, minéraux, etc.). Les deux étapes clés que sont la texturation et la formulation ont été et sont

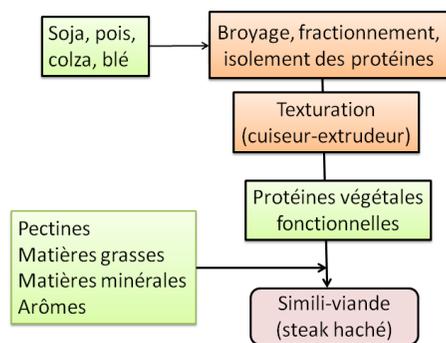


Figure 5 : Des graines protéagineuses aux hachés végétaux.

¹ Des plantes dont les graines sont riches en protéines, comme les légumes secs, mais également le soja et le colza.

toujours l'objet d'un effort important de recherche. Il n'est en effet pas facile de fabriquer un aliment à partir de protéines végétales qui suscite des sensations comparables à celles que donne la consommation d'un steak haché, voire plus encore d'un rôti de bœuf. Ce sont souvent des secrets industriels. Un grand nombre de start-up s'appuient sur l'intelligence artificielle et les avancées de la science des aliments pour optimiser les conditions de fabrication.

On assiste actuellement à un développement important de ces « ersatz » de produits animaux à partir de protéines végétales, viande surtout mais pas seulement. En plus des « steaks hachés » végétaux (sic) dorénavant bien référencés dans les linéaires des grandes surfaces, il existe également des aliments mimant les caractéristiques sensorielles des produits laitiers (lait, fromages) et des produits d'origine aquatique (filets de poissons, noix de Saint-Jacques).

Faut-il se réjouir de la mise sur le marché de ces substituts de viande ? Aujourd'hui, peut-être pas en dépit de l'impact positif généralement reconnu de ces aliments végétaux sur l'environnement, comparativement aux produits carnés auxquels ils ont vocation à se substituer (encore faudrait-il préciser de quels animaux et de quelles conditions d'élevage on parle). Leurs prix sont en effet plus élevés quand ils sont ramenés au kilo de protéines, leur composition laisse rêveur et la qualité de leurs protéines appréciées par leur composition en acides aminés indispensables (AA) est inférieure (Figure 6). Mais ce paysage pourrait changer au cours des cinq prochaines années en raison de la baisse probable des prix (les « viandes végétales » les plus élaborées coûtent encore 50 euros le kilo) et d'une optimisation des formulations visant à copier au plus près les caractéristiques d'un vrai steak haché, voire d'un steak entier en faisant appel à des imprimantes 3D comme la société israélienne Redefine Meat. Les analystes leur prédisent un bel avenir même si certaines start-up pionnières dans le domaine, comme la société Beyond Meat, font face à des difficultés de croissance.



Figure 6 : Caractéristiques comparées d'un haché végétal et d'un steak haché (produits du commerce en 2022). AA+ et AA+++ : qualité des protéines

– Les algues

Une autre approche, parfois présentée comme une solution d'avenir, serait de se nourrir avec des algues (Figure 7). Dans le monde, ce sont principalement des macro-algues récoltées en mer et sur les côtes, à l'état naturel ou cultivées, qui sont consommées en l'état ou après fractionnement en molécules élémentaires (des agents de textures par

exemple), la plus grande part en Asie. Les micro-algues, par contre, sont principalement destinées à la fabrication de compléments alimentaires.

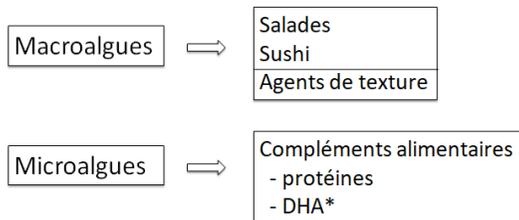


Figure 7 : Produits alimentaires à base d'algues

Trente millions de tonnes d'algues fraîches (90 000 tonnes en France), soit environ 6 millions de tonnes d'algues sèches, sont récoltées chaque année dans le monde, valeur qu'il faut rapprocher des 4 000 à 5 000 millions de tonnes/an d'aliments nécessaires pour nourrir les hommes. En 2022, les macro-algues sont donc encore très loin de contribuer significativement à l'alimentation de l'humanité. En raison de leur teneur très élevée en protéines (jusqu'à 65%), en vitamines, en minéraux et en antioxydants, qui en font des compléments alimentaires de choix, ce sont plutôt les micro-algues (spiruline et chlorelle), cultivées en plein air ou dans de longs tubes de verre, qui attirent les investisseurs. Elles constituent néanmoins des marchés de niche (seulement dix mille tonnes dans le monde) et il est peu probable qu'elles puissent devenir une alternative aux protéines animales.

Les usines vont-elles remplacer la terre nourricière ?

Les chimistes et les ingénieurs vont-ils se substituer aux agriculteurs pour nous nourrir ? À la fin du 19^e siècle, le savant et homme politique Marcelin Berthelot prévoyait que « les progrès de la chimie permettront de fabriquer nos aliments à partir du dioxyde de carbone, de l'azote et de l'oxygène présents dans l'atmosphère et de l'hydrogène isolé de l'eau ». Grâce à une énergie abondante, bon marché et non polluante à laquelle l'humanité aurait accès, une fois abouti le programme ITER² sur l'énergie générée par la fusion des atomes, il sera peut-être possible de réaliser ces synthèses à partir d'atomes disponibles sur notre planète en quantité quasi illimitée. Mais il faudra attendre plusieurs dizaines d'années, voire davantage, si toutefois ce rêve se concrétise (Figure 8).

Certes, des molécules fabriquées dans des usines par des chimistes sont déjà présentes dans notre alimentation. Mais leur quantité est négligeable par rapport aux besoins en nutriments de l'humanité. Ce sont des additifs (amidon modifiés, aspartame, acide ascorbique, acide citrique, acide sorbique, monopropylène glycol,...) et des compléments alimentaires (vitamine B, vitamine E,...). Ne comptons pas sur les chimistes pour nous nourrir ! Il sera par contre probablement possible de compter sur les nouveaux aliments sur lesquels travaillent aujourd'hui les biologistes : farines d'insectes, aliments issus de culture de cellules, protéines issues de la fermentation de précision (dont nous donnerons plus loin la définition) sont autant de pistes dont certaines ont déjà abouti et sur lesquelles des milliards de dollars sont investis en moins de cinq ans.

² Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est un réacteur expérimental à fusion nucléaire né d'une collaboration internationale à long terme entre 34 pays. L'objectif est de fusionner des atomes légers comme l'hydrogène pour former des atomes plus lourds en produisant beaucoup d'énergie.

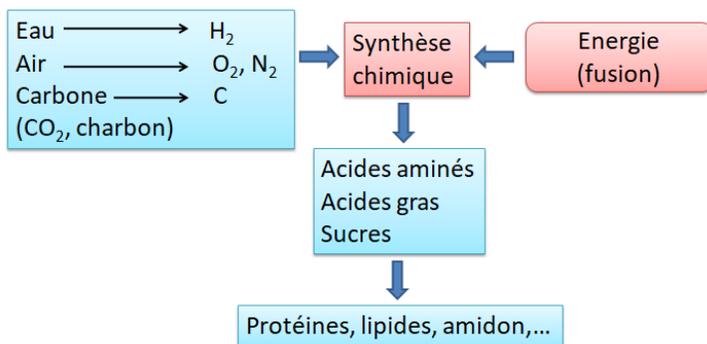


Figure 8 : La prédiction de Berthelot pourra peut-être se matérialiser... en 2100 ?

– Des insectes à notre menu

Il est souvent rappelé que selon la FAO deux milliards d'humains se nourrissent d'insectes. Il serait plus exact de dire qu'ils en mangent de temps à autre. En réalité, les insectes ne contribuent pas à assurer l'alimentation des hommes et des femmes de notre planète – pas plus que les escargots ou les cuisses de grenouilles celle des Français – à l'exception d'une très petite minorité d'entre eux, notamment en Afrique et en Asie. Régulièrement, cependant, notamment à l'occasion du salon de l'alimentation (SIAL), les médias reprennent un vieux marronnier en se demandant si notre avenir ne reposerait pas sur la consommation d'insectes.

C'est la composition en protéines des insectes (pouvant atteindre 60% de la matière sèche, c'est-à-dire une fois les insectes desséchés), en acides gras essentiels, en fibres, en vitamines et en minéraux qui attire l'intérêt de certains nutritionnistes (Tableau 4). Dans le cas des produits frais, la teneur en protéines des chenilles fraîches est cependant bien inférieure à celle de la viande ou du poisson, tout juste équivalente à celle des œufs. De sorte qu'il faudrait manger une cinquantaine de grosses chenilles pour remplacer les apports en protéines de 100 grammes de blanc de poulet !

	<i>Protéines</i>	<i>Lipides</i>	<i>Glucides</i>	<i>Eau</i>	<i>Kcal</i>
Chenilles fraîches	12	3	3	80	90
Œuf cru	12	10	traces	75	145
Blanc de poulet cuit	20	2	traces	70	120
Bavette de bœuf cru	18	3	traces	75	100
Lieu noir cru	18	1	traces	80	82
Lait entier pasteurisé	3	4	4	88	63

Tableau 4 : Composition comparée de chenilles fraîches et d'aliments d'origine animale (source : Feillet, 2013)

Il est probable que la consommation d'insectes, entiers ou en poudre, en l'état ou incorporés à des biscuits et autres produits apéritifs, se limitera à des moments de convivialité et festifs, en dehors des repas. C'est par exemple le cas au Mexique, dans la province d'Oaxaca, pour les chapulines, de petites sauterelles, qui abondent sur les marchés. En France, une entreprise comme Micronutris propose de les consommer sous forme d'un « pack Halloween, pour saupoudrer des salades ou des pâtes » ou une fois aromatisés au thym. Quand on aura noté qu'une boîte de 5 grammes de ver de farine

(ténébrion) est vendue 5 euros (soit 1 000 euros le kilo) pour « un apéritif découverte de 2 ou 3 personnes », on comprendra qu'il s'agit là d'un marché destiné aux milléniaux aisés.

Il en va autrement pour des entreprises en pleine croissance dont le marché principal est celui de l'alimentation animale, plus particulièrement celui des poissons et des volailles qui se sont toujours nourris d'insectes. Trois entreprises françaises sont des leaders mondiaux sur ce marché après avoir levé un milliard d'euros cumulés au cours des cinq dernières années : Ynsect, Innovafeed et Agronutris. Une unité industrielle peut fabriquer 15 000 tonnes par an de farines enrichies en protéines. Des huiles destinées aux animaux et les déchets valorisés sous forme d'engrais sont des coproduits de la production de ces protéines. Cette filière industrielle s'intéresse également, mais secondairement, à la fabrication d'ingrédients destinés à l'alimentation humaine, mais les autorisations de mises sur le marché sont longues et coûteuses. (Figure 9).

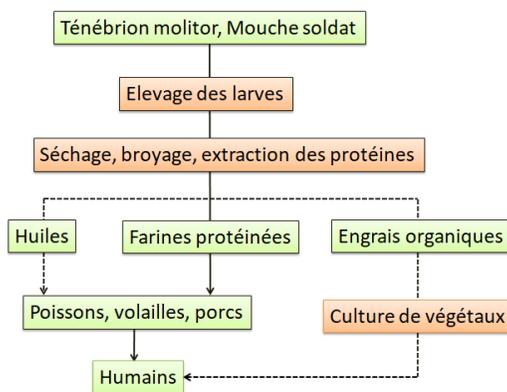


Figure 9 : Des insectes pour nourrir les animaux et indirectement les humains

Le faible impact environnemental de la production de farines protéinées à partir d'insectes, comparativement aux aliments pour animaux à base de soja et de céréales, est le principal argument mis en avant par ces entreprises pour défendre leur vision sur une nouvelle approche de l'alimentation animale et humaine : faibles dépenses énergétiques, impact réduit sur le réchauffement climatique, économie d'eau, emprise sur les sols très limitée. Les données des entreprises restent confidentielles. Il faut donc rester prudent en attendant de disposer de valeurs précises sur ces différents paramètres environnementaux.

Quoiqu'il en soit, il est très probable que l'avenir de cette nouvelle filière alimentaire de fabrication de protéines alternatives sera brillant et que les usines vont se multiplier dans le monde.

– Les viandes de culture

C'est aux avancées les plus pointues de la biologie médicale que nous devons le développement actuel de la fabrication de viandes dites de « culture » ou « cellulaires ». Chez les animaux, et l'homme en particulier, le tissu musculaire squelettique tient sa très grande plasticité à la présence de cellules souches capables de rétablir l'intégrité du tissu musculaire après une lésion. Les chercheurs ont su tirer parti de cette propriété pour régénérer des tissus musculaires humains *in vitro* (en laboratoire) une fois mis au point des milieux de culture performants. L'extrapolation de cette ingénierie cellulaire à la production de muscles de bovins a ouvert la voie à la production de viandes cellulaires.

« Avec une meilleure connaissance de ce qu'on appelle les hormones... nous échapperons à l'absurdité de cultiver un poulet entier pour en manger la poitrine ou l'aile, en cultivant ces parties séparément dans un milieu approprié ».

« Les nouveaux aliments seront dès le départ pratiquement indiscernables des produits naturels, et tout changement sera si graduel qu'il échappera à l'observation ».

Winston Churchill, *Thoughts and adventure*, 1932,
Thornton Buterworth Limited, London, p. 276

Une dizaine d'années après le premier brevet protégeant la production de viande par culture de tissus (Van Eelen *et al.*, 1999) et les travaux financés par l'agence spatiale américaine (Wolfson, 2002), deux chercheurs indiens (Bhat and Fayaz, 2011) ont fait le point sur les travaux de la précédente décennie. Après une analyse exhaustive de l'état de l'art, ils concluaient que « la production *in vitro* de viande était probablement réalisable avec les techniques d'ingénierie tissulaire existantes et pouvait présenter des avantages pour la santé et l'environnement en réduisant la pollution environnementale et l'utilisation des terres associées aux systèmes actuels de production de viande ». Ils notaient à l'époque que « la production de viande hautement structurée et non transformée était confrontée à des défis techniques très importants et que de nombreuses recherches étaient encore nécessaires pour établir un système de culture de viande *in vitro* durable à l'échelle industrielle ». En 2022, l'état de l'art s'est profondément amélioré, mais la fabrication à grande échelle et économiquement rentable de viandes ou de filets de poissons cellulaires devra encore attendre quelques années.

C'est en 2013 que le professeur de médecine Mark Post a fabriqué par culture de tissus un amas de cellules musculaires qu'il qualifiait de viande hachée. Les 140 grammes produits avaient coûté 250 000 euros. La présentation de ce « steak » à Londres, lors d'une conférence de presse, fit le tour des médias internationaux. Mais il fallut attendre 2021 pour que le premier nugget de poulet cellulaire soit autorisé par un gouvernement, celui de Singapour. D'autres préparations sorties des laboratoires d'une centaine de start-up, principalement nord-américaines et israéliennes, attendent encore des autorisations de commercialisation. En France, la start-up Gourmet fabrique du « foie gras de culture » dans ses laboratoires, visant un marché haut de gamme et donc plus rémunérateur.

Les étapes de fabrication de la viande de culture comportent l'isolement de cellules souches, leur culture dans de grandes cuves – des fermenteurs –, l'isolement des fibres musculaires et leur association avec des matières grasses, du collagène, des aromatisants et des colorants (Figure 10).

Les promoteurs de la production de viande de culture mettent en avant le respect des animaux, ce qui n'est pas contestable, et l'impact positif sur l'environnement (moins d'emprises au sol, consommation d'eau réduite, réduction des émissions de gaz à effet de serre), ce qui mérite d'être confirmé, notamment pour ce qui est des impacts sur le réchauffement climatique. Les points de blocage restent nombreux : le prix, la composition et la fabrication des milieux de culture (il faut employer des substituts au sérum de veau fœtal primitivement utilisé), la conception de bioréacteurs industriels et la réglementation.

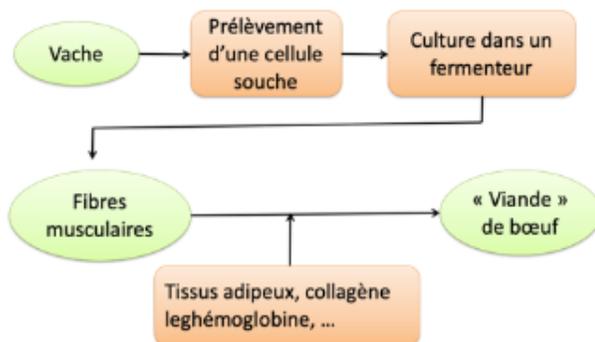


Figure 10 : De la vache au steak haché en passant par la culture de tissus

Un autre obstacle est de « reconstituer » les propriétés sensorielles et la valeur nutritionnelle d'un vrai steak. Il n'est pas facile en effet de reproduire à l'identique le muscle d'un animal qui peut être défini comme une matrice alimentaire associant des fibres musculaires, des vaisseaux sanguins, des nerfs, du tissu conjonctif et des cellules adipeuses, le tout contenant du fer héminique facilement assimilable, de la vitamine B12 et divers acides gras.

Quant à l'acceptabilité de viandes de culture par les consommateurs, l'avenir nous dira ce qu'il en est. Il est probable que leur accueil sera très différent selon les continents et les pays mais que, si les prix baissent, les propriétés sensorielles s'améliorent et les impacts environnementaux se confirment, elles finiront par s'imposer en commençant par les pays asiatiques et l'Amérique du Nord.

– Produire des protéines avec des microorganismes

Pour se nourrir, les hommes ont appris à gérer le « bon vivant » (Feillet, 2002), à s'approprier les services des microorganismes utiles tout en se protégeant des plus dangereux. Après une très longue période d'empirisme, ils ont dû attendre les découvertes du savant Louis Pasteur dans la deuxième moitié du 19^e siècle pour jeter les bases de leur exploitation rationnelle. Leur développement contrôlé dans les matières premières agricoles provoque une profonde transformation de ces dernières. C'est grâce aux bactéries lactiques, à la levure *Saccharomyces cerevisiae* et aux moisissures du genre *Penicillium*, pour ne citer que quelques-uns des auxiliaires de notre gastronomie, que la farine se transforme en pain, le raisin en vin, le lait en fromage, la viande en saucisson. Environ 30% de notre nourriture dépend de leurs activités.

Une autre manière de tirer parti des propriétés des microorganismes pour nourrir les hommes est de les « élever » dans des fermenteurs et d'en extraire des nutriments, notamment des protéines. Voilà donc la troisième domestication des êtres vivants : après celles des animaux terrestres, puis des animaux aquatiques, celle des microorganismes. Deux stratégies sont possibles : produire des protéines préexistantes dans les microorganismes ou faire produire à ces derniers des protéines animales après avoir introduit dans leur génome les gènes codant pour ces protéines. On parle alors de fermentation de précision.

Produire des protéines de microorganismes

En France, la tentative la plus spectaculaire date du début des années 1970. À l'initiative de la filiale française de la société British Petroleum et sur les conseils du professeur Jacques Sénes (CNRS), une usine pilote est construite à Lavéra pour cultiver des levures sur les N-paraffines de pétrole (des alcanes linéaires) et en extraire des

protéines destinées à l'alimentation animale et humaine (Figure 11). Elle fait suite aux travaux commencés dix ans plus tôt dans le but d'identifier des microorganismes capables de se développer sur des produits pétroliers. Dix mille tonnes de farines protéinées contenant 66% de protéines riches en lysine sont fabriquées en 1972 sous le nom de marque Toprina®. Le professeur René Dumont s'enthousiasme : « J'ai moi-même consommé des biscuits faits avec cette levure de pétrole [...] reconnue non nocive pour l'homme [...]. Si on fait les investissements suffisants, le volume de protéines que l'on pourrait ainsi obtenir aux environs de l'an 2 000 pourrait être comparable au volume de protéines que l'on obtiendra de toutes les formes d'élevage et de pêche » déclare-t-il en 1972 lors du symposium *Proteins from hydrocarbons* à Aix-en-Provence. En dépit de la performance technique, le procédé est abandonné en 1976 et les installations démantelées. Plusieurs raisons sont avancées pour expliquer cet arrêt très brutal : le choc pétrolier de 1973 et l'augmentation du prix du pétrole, le lobbying auprès du gouvernement américain des producteurs de soja aux États-Unis, qui s'inquiètent de voir fabriquer en Europe des protéines concurrentes des tourteaux pour nourrir les animaux, et enfin le nom de « steak de pétrole » – un qualificatif qui tue – accolé par les médias français à cette nouvelle ressource alimentaire. En 1975, animée par une stratégie identique, la société Imperial Chemical Industry (ICI) commercialise une protéine bactérienne destinée à l'alimentation des porcs sous le nom de Pruteen®. Elle est obtenue en utilisant le méthanol comme substrat carboné et la bactérie *Methylophilus methylotrophus* comme agent de fermentation. La tentative est un échec commercial en raison d'un prix trop élevé.

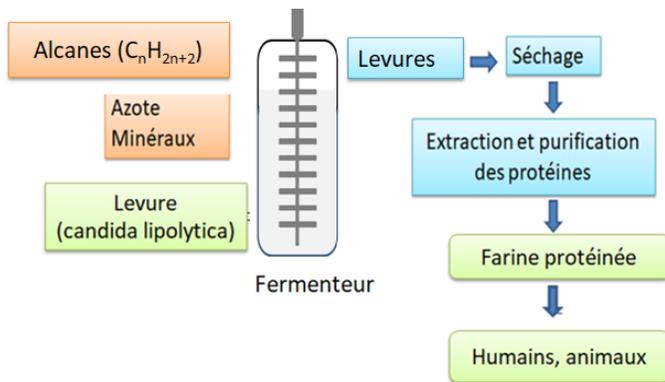


Figure 11 : Fabrication de farines protéinées à partir de N-paraffines de pétrole

Cinquante ans après les tentatives infructueuses des années 1970, des start-up réinvestissent le marché des protéines de microorganismes. La plus spectaculaire des innovations revient à la société Solar Food (Finlande) qui utilise des bactéries hydrogénotropes pour fabriquer des protéines à partir du dioxyde de carbone contenu dans l'air et d'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau (Figure 12). Sous le nom de Solein®, un mélange de cette protéine (65–70%), de matières grasses (5-8%), de fibres alimentaires (0–15%), de minéraux (3–5%) et de vitamines B, pourrait être commercialisée vers 2025. Solein® a été autorisée à la consommation par le gouvernement de Singapour en 2022 ; des dossiers d'homologation ont été déposés en Europe et aux États-Unis. Le rêve de Berthelot devient une réalité, à la réserve près que ce sont les biologistes et non les chimistes qui ont trouvé la solution.

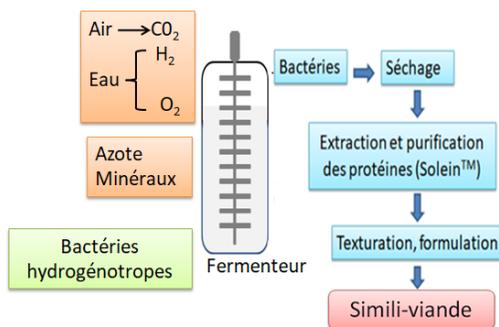


Figure 12 : Fabriquer des protéines avec du dioxyde de carbone, de l'hydrogène et de l'azote

Le principal frein au développement de ces protéines de microorganismes est leur coût comparativement à celui des protéines végétales. Leur impact environnemental n'est pas disponible. En 2022, les seules autorisées sont produites par le champignon filamenteux *Fusarium venenatum*. Elles servent à fabriquer le Quorn®, un substitut de viande vendu sous forme de hachés, d'émincés ou de nuggets (Figure 13). Sa commercialisation par la société Rank Hovis McDougall date de 1985. Initialement destinée à une production de masse pour nourrir le monde, sa cible de marché se limite aujourd'hui à des consommateurs aisés qui souhaitent diminuer ou éliminer la consommation de viande.

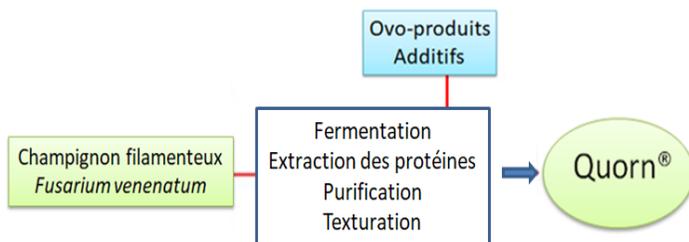


Figure 13 : En 2022, et depuis 1985, le Quorn® est vendu sous différentes formes prêtes à l'emploi.

Faire produire des protéines animales par des microorganismes

La fabrication de protéines à plus haute valeur ajoutée que les protéines de microorganismes ne possédant pas de propriétés fonctionnelles ou nutritionnelles particulières attire davantage les investisseurs. Elle repose sur la possibilité offerte par les outils développés par les biologistes moléculaires au cours des années 1970 pour transférer des gènes d'une espèce à une autre, par exemple d'un animal à une bactérie, comme cela a été réalisé en 1980 par une équipe japonaise pour produire de la chymosine avec une bactérie.

De quoi s'agit-il ? La présure est un mélange d'enzymes utilisé en fromagerie pour précipiter et coaguler la caséine, la principale protéine du lait, et former le caillé. Elle est extraite de la caillette du veau, le quatrième estomac des bovins. La protéine la plus active de ce mélange est la chymosine. Les différentes étapes de sa fabrication sont schématisées Figure 14. Aujourd'hui, de nombreux artisans et industriels ont remplacé la présure par cette chymosine recombinante pour fabriquer leurs fromages.

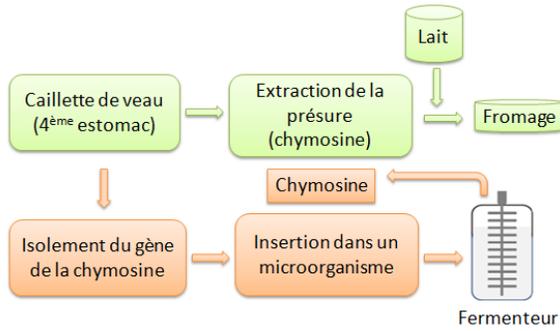


Figure 14 : Fabrication de chymosine recombinante pour remplacer la présure en fromagerie

Ce n'est qu'une quarantaine d'années plus tard que des industriels se sont inspirés de cette première pour fabriquer une protéine de lait (la caséine) destinée à la fabrication de produits laitiers (lait, glace, fromage) (Figure 15) ou une protéine d'œuf (l'ovalbumine). Comme pour la chymosine, ils font appel à des microorganismes dans lesquels les gènes codant pour la caséine ou l'ovalbumine ont été introduits. « Fermentation de précision » est le nouveau qualificatif donné à cette fermentation.

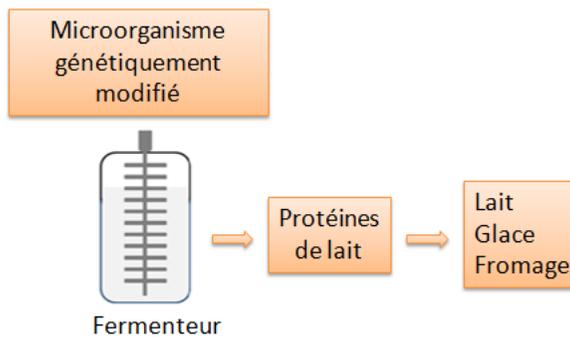


Figure 15 : Fabrication de protéines de lait par fermentation de précision destinées à la fabrication de « produits laitiers » sans lait.

Le recours à la biologie de synthèse et aux techniques les plus récentes de réécriture du génome (CRISPR-Cas9) est à l'origine de l'explosion récente du nombre de start-up qui se sont engagées dans cette voie. La start-up américaine Perfect Day, créée en Californie en 2014, est pionnière en ce domaine. En France, la plus avancée est Standing Ovation. Elle a signé, le 15 novembre 2022, un partenariat exclusif avec le groupe Bel pour accélérer le déploiement de la caséine alternative dans le domaine des applications fromagères.

Considérant l'importance et la croissance des fonds levés par les start-up (en millions de dollars : 21 en 2018, 214 en 2019, 904 en 2021), on peut s'attendre à un développement important de la fermentation de précision. Mais auparavant, trois obstacles devront être levés (Laisney, 2022) : la saturation des capacités de fermentation dans le monde et donc le besoin de très gros investissements pour produire des quantités significatives de protéines, les coûts encore élevés de production liés aux coûts des investissements et de l'énergie, la présentation de dossiers capables de convaincre les agences sanitaires de l'innocuité de ces nouveaux aliments. L'attrait des consommateurs pour une alimentation respectueuse des animaux pourrait accroître la demande. À

l'inverse, la recherche d'une alimentation qualifiée de naturelle (sans d'ailleurs savoir précisément ce que cela signifie) pourrait avoir l'effet inverse. Il est donc bien difficile de prévoir quel sera l'accueil réservé à ces nouveaux aliments. Des bureaux d'études sont néanmoins très optimistes sur l'avenir de cette nouvelle industrie : selon le cabinet d'étude RethinkX (2019), 90% des protéines du lait seront issues de la fermentation de précision en 2030. À voir !

– Éthique de l'alimentation et protéines alternatives

Un système alimentaire peut être considéré comme éthique s'il contribue à relever le défi de bien nourrir l'humanité en permettant à tous les hommes de vivre longtemps et en bonne santé, à lutter contre le réchauffement climatique, à respecter la biodiversité et les terres arables, à protéger les comportements culturels des populations, à veiller au bien-être des animaux, à assurer un juste partage des créations de valeurs (Feillet, 2022).

Les simili-viandes et les protéines alternatives respectent-elles ces exigences ? La grille de lecture présentée dans le tableau 5 pourrait aider à répondre à cette interrogation dans la mesure où des experts seraient capables d'attribuer, pour chaque denrée et chaque item, une note comprise entre 1 et 5. Mais à ce jour, ces experts rencontreraient bien des difficultés pour cocher toutes les cases. Par ailleurs, pour aider à la décision d'encourager ou non la production de l'un ou l'autre de ces nouveaux aliments, les résultats de cet exercice doivent être comparés aux notes obtenues par les productions et les consommations de protéines végétales et animales sous les formes traditionnelles que nous connaissons depuis des siècles (produits carnés, produits aquatiques, produits laitiers, ovoproduits, céréales, légumes secs, etc.). Ce qui rend l'exercice encore plus difficile.

<i>Respecter les hommes</i>	<i>Respecter la nature</i>
Garantir la qualité sanitaire des aliments	Limiter les émissions de GES*
Nourrir l'humanité	Préserver la biodiversité
Respecter les habitudes culturelles	Préserver les ressources en eau
Veiller au partage de la création de valeurs	Préserver les terres cultivables
* Gaz à effet de serre	Garantir le bien-être des animaux

Tableau 5 : Pour une éthique de l'alimentation, respecter la nature et les hommes

Dans la rubrique « respecter les hommes », les consommateurs européens devraient être rassurés sur la qualité sanitaire des protéines alternatives et des aliments qui en contiennent dans la mesure où, s'appuyant sur la réglementation « Novel food » (Règlement UE 2015/2283), l'autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) aurait émis un avis positif. Cela est déjà le cas pour certaines farines protéinées d'insectes, mais pas encore pour les protéines issues de la fermentation de précision et (le seront-ils un jour ?) pour les viandes de cultures³. Pour ce qui est de nourrir l'humanité, il faut à la fois se pencher sur la capacité de ces nouvelles entreprises à produire de manière économique des quantités significatives de protéines (difficile de répondre à cette interrogation avant qu'un nombre suffisant d'usines soient entrées en fonctionnement) et sur la valeur nutritionnelle des nouveaux aliments. Sur ce dernier point, il faudra examiner au cas par cas leurs caractéristiques mais on peut estimer qu'il

³ Fin 2022, le regard de la Food and Drug Administration américaine sur la viande de poulet cellulaire de la start-up californienne Upside Foods ne semble pas à ce jour négatif – une première ! –, sans que cela préjuge d'une autorisation rapide de mise sur le marché.

sera très difficile de fabriquer des denrées alimentaires qui atteignent les très hauts standards nutritionnels de la viande (qui n'est pas qu'un assemblage de fibres musculaires), du lait et des œufs (dont les protéines contiennent les acides aminés indispensables dans de parfaites proportions) et du poisson. Quant à respecter les habitudes culturelles, c'est une autre histoire ! Cependant, il ressort de plusieurs sondages que les jeunes générations ont en ce domaine une capacité d'adaptation et d'acceptabilité bien supérieure à celle de leurs aînés (ce qui est vrai pour tout ce qui est nouveau). Ils sont également plus sensibles à la nécessité de respecter la nature. Dernière question, qui n'est pas la moindre. Que deviendront les paysans et quels seront les principaux bénéficiaires de la septième transition : investisseurs, industriels, consommateurs ? La question reste ouverte.

Dans la rubrique « respecter la nature », pour savoir quelles notes attribuer, il faut procéder à une analyse du cycle de vie (ACV), c'est-à-dire recenser et quantifier, tout au long de la vie de ces nouveaux aliments, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Seulement alors, il devient possible de mesurer les impacts de la production et de la consommation d'une denrée alimentaire sur les émissions de gaz à effet de serre, la biodiversité, la consommation d'eau prélevée, les surfaces de terres arables impactées. L'ensemble de ces données n'existe pas ou n'est pas disponible. Il est néanmoins raisonnable d'estimer que les emprises au sol, la consommation d'eau et le bien-être animal seraient bien notés. Pour la biodiversité, les impacts sont nuls et, de ce fait, inférieurs à ceux d'un troupeau de bovins élevés à l'herbe. La question reste ouverte pour les impacts sur le réchauffement climatique.

Devant la complexité du système alimentaire et la multiplicité des enjeux, il est très difficile de prévoir quelles protéines alternatives, quels nouveaux aliments seront produits de manière significative dans dix ans. Il est néanmoins raisonnable de penser que les farines protéinées isolées de larves d'insectes auront trouvé leur place sur le marché des aliments pour animaux. L'avenir des protéines végétales est peut-être davantage dans des aliments encore à inventer que dans des pseudo-viandes. Pourquoi en effet copier les produits carnés et aquatiques avec des denrées d'origine végétale au lieu de conserver à celles-ci leur spécificité. Les protéines issues de la fermentation de précision pourraient également avoir un bel avenir en raison de leur positionnement sur des aliments à haute valeur ajoutée. Enfin, le devenir des viandes cellulaires est encore à ce jour un grand point d'interrogation.

BIBLIOGRAPHIE

- A RethinkX, 2019, Sector Disruption Report: Rethinking Food and Agriculture 2020-2030.
- Bhat Z.F. and Fayaz H., 2011, *Prospectus of cultured meat - Advancing meat alternatives*, J Food Sci. Technol., 48, 125-140.
- Feillet P., 2002, *Le bon vivant - Une alimentation sans peur et sans reproche*, INRA Éditions.
- Feillet P., 2013, *Mangerons-nous tous des insectes en 2050 ?*, Insectes 13-17, n° 169.
- Feillet P., 2014, *Les protéines d'avenir*, note d'analyse prospective n° 4 Futuribles International.

- Feillet P., 2022, *Pour une éthique de l'alimentation – Apprivoiser la nature*, Éditions Quae.
- Hamon S., 2019, *L'odyssée des plantes sauvages et cultivées*, Édition Quae.
- Laisney C., 2022, *La fermentation de précision, une révolution silencieuse ?* <https://www.stripfood.fr/la-fermentation-de-precision-une-revolution-silencieuse/>
- Malassis L., 1994., *Nourrir les hommes : un exposé pour comprendre, un essai pour réfléchir*, Flammarion, Paris.
- Van Eelen W.F., van Kooten W.J. and Westerhof W., 1999, WO/1999/031223, *Industrial production of meat from in vitro cell cultures*, Patent Description.
- Wolfson W., 2002, *Raising the steaks*, New scientist 2374-5, 60-63.