

LES PROTÉINES DANS NOTRE ALIMENTATION : MUTATIONS, INNOVATIONS, VERS LE STEAK ARTIFICIEL...

Par Alain BOUDET¹

Le système alimentaire considéré globalement, « de la ferme à la fourchette », représente un ensemble d'une grande complexité. On a évoqué « un système de systèmes » pour imaginer les réseaux d'interactions et de rétroactions qui s'installent entre les événements et les niveaux d'interventions et pour inciter sur le sujet à des analyses holistiques. Dans ce contexte, le thème des protéines peut sembler une composante fragmentaire, mais il revêt cependant une importance croissante. Nous amorçons en effet une « transition protéique » qui pourrait bouleverser nos habitudes alimentaires et le sujet se révèle d'une grande actualité avec articles dans la grande presse et émissions télévisées à l'appui. Diverses paroles s'expriment sur ce thème, celles de scientifiques mais aussi de philosophes ou de sociologues, et encore celles de groupes militants, d'entrepreneurs ou de lobbys. Les voix sont parfois discordantes et le but de cette communication vise à brosser un tableau factuel de la situation, en laissant le lecteur décider si les nouvelles opportunités émergentes représentent des solutions pour le futur ou encore des approches peu réalistes reposant sur des effets de mode.

Les protéines, structure, fonctions, besoins alimentaires

Les protéines sont des macromolécules (de grosses molécules) complexes et très diversifiées qui résultent de l'association d'unités élémentaires : les acides aminés. Ces composés possèdent tous un motif moléculaire commun portant une fonction acide et une fonction aminée, d'où leur nom - acides aminés -, et une chaîne latérale chimiquement différente dans la vingtaine d'acides aminés constitutifs des protéines. Parmi ces vingt acides aminés neuf ne peuvent être synthétisés par l'organisme humain et doivent être apportés par l'alimentation. On dit qu'ils sont « essentiels » ou « indispensables ». Les protéines de notre organisme peuvent comprendre pour certaines plus d'un millier d'acides aminés dont la nature et la position relative sont non aléatoires mais déterminées par la séquence en nucléotides de nos gènes. La chaîne protéique complète peut être représentée en trois dimensions comme une « pelote de laine » avec des creux, des bosses, des replis... qui offrent des interfaces d'interactions spécifiques avec l'environnement moléculaire.

¹ Communication présentée à l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse à la séance du 27 avril 2023.

Les protéines de notre organisme

Les protéines jouent des rôles fondamentaux à la fois structurels et fonctionnels dans notre organisme. Au niveau de la structure, elles représentent 15% environ de notre masse corporelle. Ce sont des composantes essentielles des muscles mais aussi des ligaments, cartilages, tendons (à travers la protéine collagène) ; elles sont constitutives de la peau et des phanères... Au niveau fonctionnel, elles assurent des tâches cruciales de nos usines cellulaires : enzymes, récepteurs, transporteurs, hormones, anticorps... Leur nom rend bien compte de leur rôle primordial - en grec *protos* signifie premier. Notre organisme doit donc à tout moment assurer une synthèse adaptée à ses besoins en protéines à partir des briques élémentaires. Cette synthèse met en jeu deux sources d'acides aminés :

1/ ceux issus de la dégradation des protéines de notre alimentation - nous n'utilisons pas les protéines alimentaires telles quelles, mais après leur digestion qui libère des acides aminés,

2/ ceux provenant du renouvellement permanent (*turnover*) de nos protéines corporelles par protéolyse avec libération transitoire d'acides aminés éventuellement réutilisés pour une resynthèse. Ce *turnover* impliquant des demi-vies très variables selon le type de protéines (de dix minutes à plusieurs semaines), correspond à un processus très sophistiqué permettant d'ajuster en permanence l'équipement protéique.

Les protéines de notre alimentation

Ces macromolécules font partie dans notre ration alimentaire des macronutriments au même titre que les glucides et les lipides. Les protéines se différencient cependant nettement de ces derniers qui ont un rôle essentiellement énergétique alors que les protéines interviennent, comme évoqué plus haut, dans la « construction » de notre organisme. Les besoins en protéines ont été estimés en moyenne par l'ANSES² à 0,83g par kilogramme de poids corporel et par jour, soit pour un homme de 70 kg un apport quotidien d'une soixantaine de grammes. De façon optimale les protéines alimentaires doivent présenter une composition en acides aminés équilibrée et s'avérer digestibles. Les aliments les contenant en mélange avec des glucides et des lipides doivent se révéler savoureux et économiquement accessibles.

Protéines animales vs protéines végétales

Les protéines sont présentes à de bonnes concentrations dans des aliments d'origine animale (viandes, charcuterie, poisson, produits laitiers, œufs...) et d'origine végétale (graines de légumineuses et de céréales) dans lesquelles elles sont en proportions importantes.

La figure 1 établit un comparatif des caractéristiques des protéines d'origine animale et végétale. La viande rouge s'avère économiquement et écologiquement critiquable en raison de son prix, du faible rapport de conversion des aliments végétaux protéinés (tourteaux de soja essentiellement) en protéines animales et aussi des émissions de gaz à effet de serre associées à l'élevage. Les déséquilibres en acides aminés des protéines végétales sont illustrés par les insuffisances en méthionine des graines de

2 ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

PROTÉINES D'ORIGINE ANIMALE	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
- Sources variées et plats appétents - Riches en A.A. essentiels - Généralement digestes - Apports de Ca, Fe, Zn, Se, Vit. B12, B3, B6	- Présence de matières grasses (Ac gras saturés, cholestérol) - Viandes rouges : prix élevé et associées à l'émission de GES
PROTÉINES D'ORIGINE VÉGÉTALE	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
- Économiques - Écologiques - Variétés de sources	- Parfois carencées en A.A. essentiels - Digestibilité variable - Faibles apports en vitamines et oligoéléments - Goût neutre

Fig. 1 : avantages et inconvénients de protéines de différentes origines.

légumineuses et en lysine des graines de céréales. Les populations usant de régimes à forte composante végétale ont depuis longtemps traditionnellement et empiriquement résolu le problème par des stratégies de complémentation : riz/lentilles en Asie, semoule/pois chiches en Afrique du Nord, haricots/riz ou maïs en Amérique du Sud. La digestibilité des protéines végétales est parfois limitée par la présence dans les organes consommés, essentiellement dans les graines, d'antinutritionnels - tannins, inhibiteurs tryptiques... - qui réduisent la dégradation des protéines en acides aminés. Finalement, on peut dire que les protéines végétales ne sont pas de mauvaise qualité mais de moins bonne qualité que les protéines animales.

La consommation de protéines animales s'est accrue chez nos ancêtres du genre *Homo* avec le développement de la chasse que l'on peut situer à la transition entre *Homo habilis* et *Homo erectus*, il y a plus d'un million d'années. Certains paléontologues³ pensent que la consommation de viande est sans doute un facteur déclencheur du processus d'hominisation. Antérieurement aux *Homo* « chasseurs », leurs ancêtres comme les australopithèques avaient une alimentation en partie carnée avec la consommation de petits animaux, de batraciens ou de restes d'animaux morts - les paléontologues utilisent le terme de « charognards » dans ce dernier cas. Si l'on fait un bond dans le temps et si l'on se situe à la fin du XVI^e siècle, on peut constater que la majorité de la population doit se contenter de bouillies de céréales et de bouillons de légumes, et que la primauté de la viande s'impose comme marqueur de l'aristocratie européenne. Cette association⁴ entre « une élite » et une alimentation carnée se retrouve encore dans de nombreux pays en développement, mais s'est estompée en France depuis les Trente glorieuses, la viande y bénéficiant en principe à toutes les couches de la population. La répartition mondiale de la consommation de viande répertoriée par la Food and Agriculture Organization (FAO) identifie des pays ou régions à forte consommation : Amérique du Nord, Brésil, Argentine, Australie, Europe, des pays en évolution rapide comme la Chine

3 Marylène Patou-Mathis, *Mangeurs de viandes*, Paris, Éditions Perrin, 2009.

4 Florent Quellier, *Histoire de l'alimentation, de la préhistoire à nos jours*, Paris, Belin, 2021.

qui a multiplié par vingt sa consommation entre 1960 et 2020, et des zones comme l'Afrique ou l'Inde où l'alimentation demeure essentiellement de type végétal. De façon tout à fait intéressante, il faut noter que la demande mondiale en protéines, végétales et animales, ne cesse de s'accroître.

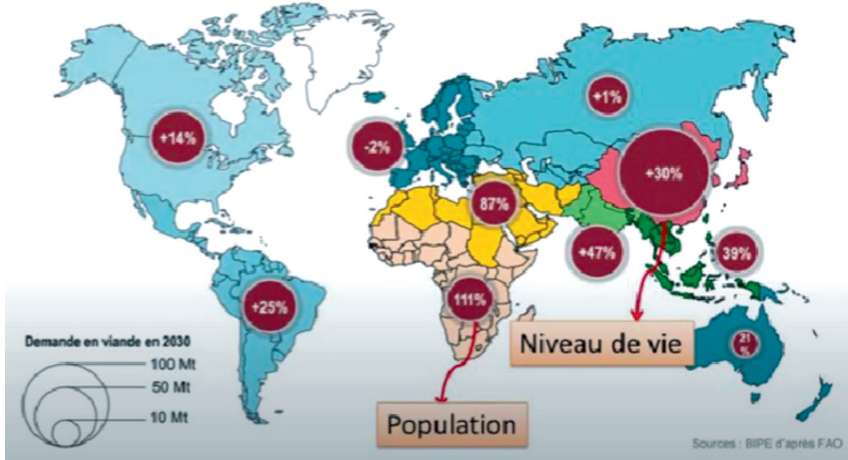


Fig. 2 : évolution de la demande en viande entre 2010 et 2030 selon la FAO.

La figure 2 projette les niveaux d'augmentation de la consommation de viande à échéance 2030, en soulignant que les facteurs majeurs du processus d'accroissement sont l'élévation du niveau de vie et l'expansion démographique. Dans ce contexte se pose une question cruciale : comment alimenter en protéines une population mondiale de 10 milliards d'individus en 2050, alors que les surfaces agricoles ne peuvent s'accroître que marginalement et que le recours à une agriculture intensive qui a jusqu'à présent contribué à satisfaire aux besoins, est de plus en plus critiqué. Une réflexion se développe donc sur une transition protéique qui remet en cause la consommation de protéines animales et qui repose sur les arguments suivants :

1/ L'élevage est une composante importante des émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture. L'agriculture et l'alimentation sont responsables d'environ 26% des émissions totales de gaz à effet de serre (les transports, l'industrie et l'habitat représentent le complément à 100 %). Sur ces 26%, la moitié, soit 13%, peut être attribuée à l'élevage en incluant les émissions de méthane liées aux éructations des ruminants, au travail agricole associé à la production d'aliments pour le bétail et à la gestion des prairies et enfin aux émissions de protoxyde d'azote formé par transformation des déjections animales.

2/ La consommation de viande entraîne des risques de cancer. Selon le centre international de recherche sur le cancer, on observe une association entre la consommation de viande rouge et l'apparition de certains cancers (colorectal). L'association est encore plus marquée pour les charcuteries qui ont des effets cancérigènes probables. Cependant ces réserves concernent les gros consommateurs de viande et l'ANSES conseille seulement de ne pas dépasser 500 g de viande rouge par semaine.

3/ Le bien-être animal est important. Pourquoi supprimer une vie animale pour

satisfaire une envie gustative humaine alors qu'il y a des alternatives - végétarienne, végétalienne, végane ? La prise en compte du bien-être animal devient un sujet de préoccupation croissante, en particulier chez les jeunes générations. Cela se traduit par des campagnes dénonçant certains modes d'élevage et par des comportements individuels excluant dans le régime alimentaire la viande et les produits alimentaires dérivant des animaux. Une attitude plus radicale et quasiment philosophique se rencontre chez les végans. Selon France Agrimer 2,2% des Français au total ne consomment pas de viande, mais le chiffre atteint 12% chez les plus jeunes (18-23 ans) selon une enquête de 2018 du Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de vie (CREDOC). Le nombre de « végans stricts » oscille selon les estimations entre 90 000 et 300 000, en étant toutefois en augmentation. De manière générale ces chiffres se situent dans la moyenne basse des pays de l'Union européenne.

4/ Le coût économique élevé des protéines animales et le mauvais ratio de conversion des protéines végétales (tourteaux) en protéines animales. Ce point est illustré par des données récentes du CREDOC qui indiquent que 566 millions de tonnes de protéines végétales sont produites annuellement dans le monde. Sur cette quantité 440 millions de tonnes, soit 80%, sont consacrées à l'alimentation animale pour produire 89 millions de protéines animales destinées à la consommation humaine. Le taux de conversion est seulement de 20%, et 350 millions de tonnes de protéines végétales qui pourraient être utilisées pour l'alimentation humaine sont ainsi perdues. Ce bilan fait apparaître un niveau d'intervention potentiel pour améliorer la disponibilité de protéines alimentaires.

5/ Le secteur représente une source de pollution et utilise de grandes quantités d'eau.

Ce sont donc des contextes environnementaux, sanitaires, démographiques et relatifs au bien-être animal qui invitent à diversifier davantage nos sources de protéines alimentaires vers les protéines végétales et à nous intéresser à des protéines alternatives. Ces différentes préoccupations ont été reprises par la revue médicale *The Lancet* qui a réuni un groupe d'une quarantaine d'experts pour définir un régime bon à la fois pour la santé et pour la planète : « *The planetary health plate* » (figure 3).



Fig. 3 : l'assiette « bonne » pour la santé et pour la planète selon *The Lancet*.

Le régime optimal pour les adultes⁵ est symboliquement représenté par une demi-assiette de fruits et légumes, l'autre moitié se compose essentiellement de céréales « complètes », de protéines végétales, d'huiles végétales insaturées, de quantités modestes de viande et de produits laitiers ainsi que de certains sucres ajoutés et féculents. En France nous sommes encore loin de ces propositions. Dans notre alimentation, le rapport protéines animales sur protéines végétales est de 65/35 alors que l'assiette du *Lancet* recommanderait plutôt un rapport de 15/85. Les incitations des institutions françaises visent plus modestement à ramener ce rapport à 50/50 en recommandant un accroissement de la consommation de protéines végétales. Alors que la production globale de ces protéines demeure largement déficitaire dans l'hexagone et que nous importons la moitié des « tourteaux » destinés à l'alimentation animale, les progrès demeurent lents et on peut y voir plusieurs causes. Tout d'abord des facteurs culturels dans un pays où la primauté de la viande est fortement ancrée. Le sociologue de l'alimentation Jean-Pierre Poulain le confirme en disant que « *la viande est le produit central du modèle alimentaire français* ». En outre, d'autres facteurs techniques interviennent : les protéines végétales sont issues principalement des graines de légumineuses (soja, lentilles, haricots, pois, pois chiches...) dont la consommation demande une préparation culinaire pour leur donner un goût agréable. Cette étape est consommatrice de temps pour une société qui veut cuisiner rapidement et simplement, et elle peut être considérée comme une contrainte. Un autre facteur, peut-être moins poétique, réside dans l'inconfort digestif lié à la digestion des légumineuses qui, dans la plupart des cas, entraîne des flatulences liées à la fermentation dans le colon d'oligosaccharides (verbascose, raffinose, stachyose...) non transformés antérieurement dans le cheminement digestif et donnant lieu à la libération de CO₂, d'hydrogène et de méthane.

Les protéines alternatives

Les hachés végétaux

Pour amplifier la consommation de protéines végétales, une stratégie, initiée dans les années 80 en Angleterre avec l'apparition du « burger végétarien », s'est fortement développée depuis une vingtaine d'années. Il s'agit de conditionner les protéines végétales pour éliminer des limitations évoquées plus haut et pour leur donner l'apparence d'un haché animal. Les étapes mises en jeu impliquent le broyage des graines, l'isolement d'une fraction protéique, le traitement de cette fraction dans un cuiseur - extracteur où interviennent des traitements thermique et mécanique qui en quelque sorte transforment la poudre en fibres et donnent une texture au produit qui est ensuite enrichi de différents ingrédients : colorant, arômes, graisses, sel, sucre et autres additifs. On arrive ainsi à mimer avec une certaine efficacité le goût et l'apparence d'un haché animal.

Sur la figure 4 on peut ainsi voir un burger végétal issu de la firme américaine Beyond meat⁶ qui, avec sa concurrente Impossible food, domine le marché mondial. En France les gouvernements ont soutenu ce type d'initiatives et diverses start-up commercialisent

5 <https://eatforum.org/learn-and-discover/the-planetary-health-diet/>.

6 <https://www.beyondmeat.com>.



Fig. 4 : un burger végétal de « beyond meat ».

des hachés végétaux : Happyvore, Umiami, La Vie... La démarche est prisée surtout par les jeunes générations et des progrès sont enregistrés concernant les prix et la limitation des additifs pour éviter d'entrer dans la catégorie des produits ultra-transformés souvent décriés. L'appréciation du goût et de la ressemblance avec les hachés animaux demeure à l'évidence assez personnelle et subjective. Le procédé a été étendu à la production d'autres simili aliments carnés issus de protéines végétales, tels saucisse, bacon, et aussi crevettes, coquilles Saint-Jacques... Il est à noter que sous l'action du lobby de la viande le gouvernement français a, par un décret d'octobre 2022, interdit l'appellation « steak végétal » pour ces produits analogues d'aliments carnés.

Les protéines d'insectes

Les humains ont depuis longtemps consommé des insectes et les ancêtres d'*Homo sapiens* les mettaient certainement à leur menu. Aujourd'hui, deux milliards d'individus mangent des insectes pour compléter leur ration alimentaire, essentiellement en Asie et en Afrique, et la FAO recommande d'une manière générale la consommation d'insectes pour pallier le manque de protéines alimentaires. Les insectes sont de très bons convertisseurs de déchets ou coproduits d'origine biologique, issus de diverses industries alimentaires, en protéines de haute qualité. Ils transforment ainsi une biomasse non comestible en aliments protéinés. Dans les dix dernières années, on a assisté en France à un développement spectaculaire de l'élevage industriel d'insectes grâce à des subventions d'origine gouvernementale et européenne. Ynsect, Innovafeed et Agronutris sont en France les sociétés majeures de ce secteur et représentent en même temps des leaders mondiaux. D'une manière générale, trois produits commerciaux sont le plus souvent issus de la transformation de larves d'insectes : une farine protéinée, une huile comestible et un engrais biologique. Les cibles pour la consommation des deux premiers produits sont essentiellement l'alimentation animale : aquaculture et volailles et aussi animaux domestiques. Une introduction dans l'alimentation humaine est en émergence et fait l'objet de demandes de commercialisation à l'échelle européenne auprès de l'European Food Security Agency (EFSA) qui met en jeu la procédure rigoureuse « *Novel Food* » pour l'autorisation de mise sur le marché. En France, la firme Agronutris a obtenu cette autorisation pour une farine protéinée issue de la larve du scarabée *Tenebrio molitor*. D'autres autorisations ont aussi concerné en Europe des dérivés du criquet ou du grillon. En France la firme Ynsect vient de développer près d'Amiens le projet Ynfarm qui va représenter dans un complexe de 50 000 m² la plus grande ferme-usine verticale

du monde avec des perspectives de production de l'ordre de 100 000 tonnes annuelles. Il est évident que l'acceptabilité des produits pour l'alimentation humaine sera plus facile pour des farines protéinées introduites dans des aliments conventionnels (biscuiterie, boulangerie, pâtisserie...) que pour des insectes entiers dont la consommation épisodique sera limitée à des événements récréatifs... La présence de farines d'insectes doit être mentionnée sur les produits commercialisés et, au-delà de leur sécurité sanitaire, les firmes devront clairement démontrer l'impact environnemental limité des chaînes d'élevage, qui n'est pas toujours indiqué... Le marché des insectes comestibles à l'échelle mondiale a été évalué à 600 millions de dollars en 2022.

Les protéines issues de cultures cellulaires

Avec ce volet nous abordons des approches qui sont directement inspirées des avancées de la recherche fondamentale en biologie. Il s'agit tout d'abord de l'exploitation des connaissances sur les cellules souches qui ont valu en 2012 un prix Nobel à Yamanaka et Gurdon. Ces cellules, qui peuvent être prélevées dans des tissus spécifiques de l'organisme, sont des cellules mères pluripotentes qui peuvent se multiplier, et à partir desquelles tous les autres types cellulaires peuvent se différencier sur des milieux appropriés. Ces propriétés ont été exploitées dans le domaine de la thérapie cellulaire pour la régénération de tissus ou de parties d'organes. Elles le sont actuellement pour produire de la viande *in vitro*. Il s'agit dans ce cas de prélever sur un animal, bovin par exemple, des cellules souches et de les orienter vers la production de cellules musculaires sur des milieux de culture appropriés. Ces opérations se réalisent dans des fermenteurs de grande taille où sont produites les cellules qui pourront être organisées en fibres proches de la structure du tissu musculaire. Celles-ci sont ensuite associées à d'autres composants : matières grasses, exhausteurs de goût, arômes, colorants, collagène pour restituer au mieux l'apparence de la viande. Ces étapes de formulation utilisent même dans certains cas l'impression 3D pour aboutir à un produit très proche de la viande naturelle avec les coûts correspondants... Les investissements des start-up travaillant sur la viande cellulaire sont particulièrement importants aux USA, Israël, Pays-Bas, Singapour. La France est peu présente dans la compétition mondiale, mais se signale par une initiative originale, celle de la production de foie gras de culture par la start-up Gourmeyer qui a reçu des subventions importantes du gouvernement. Le créneau est intéressant car il concerne un produit à forte valeur ajoutée, souvent décrié par les opposants à la souffrance animale. Le schéma de production implique le prélèvement



Fig. 5 : le foie gras cellulaire de la start-up Gourmeyer.

de cellules souches de canard, leur différenciation en cellules de foie puis des étapes de formulation et de conditionnement complexes et confidentielles pour aboutir à un produit qui a au moins l'apparence du foie de canard traditionnel.

Une autre société française, Vital Meat, est plutôt spécialisée dans la production de viande de poulet de culture. Le slogan commun de ces start up pourrait être « Manger de la viande sans tuer les animaux ». Ceci en limitant les dimensions négatives des élevages industriels mais des avancées technologiques sont encore nécessaires pour optimiser les milieux de culture et réduire les coûts de fabrication. Le Sénat français vient de produire un rapport⁷ assez réservé sur cette technologie : il y précise que « *le développement des aliments cellulaires ne correspond pas à un modèle d'alimentation souhaitable et que la diversification des régimes alimentaires en augmentant la part de protéines végétales permettrait d'atteindre le même résultat plus simplement et rapidement* ». Dans la même ligne le gouvernement italien envisage d'interdire la viande cellulaire : sont avancés des arguments culturels, anthropologiques et éthiques. Des freins culturels sont évidents en Europe et des progrès sont également encore nécessaires pour optimiser les milieux de culture et réduire les coûts de fabrication. Si des autorisations de commercialisation ont abouti à Singapour en 2020 et aux USA en 2023 pour le poulet de culture, aucune demande d'autorisation n'a encore été présentée aux autorités européennes compétentes. Une accélération de l'intérêt pour ces nouveaux produits se manifeste cependant au niveau mondial depuis 2020 et différents pays (USA, Chine, Pays-Bas) s'engagent politiquement dans le soutien à l'agriculture cellulaire.

Les protéines issues de fermentation de précision

La fermentation correspond à l'exploitation des propriétés de micro-organismes pour la transformation de matières organiques (la fermentation alcoolique, la panification...). L'expression « fermentation de précision » est utilisée pour désigner une nouvelle domestication des micro-organismes qui, modifiés, produiront à la demande des protéines spécifiques. Il s'agit de l'extension du principe d'obtention de protéines recombinantes, maîtrisé depuis les années 80 par introduction dans le génome des bactéries de gènes humains ou animaux codant pour des protéines d'intérêt thérapeutique comme l'insuline ou alimentaire comme la chymosine. La caractérisation d'un nombre croissant de gènes fait que cette approche s'est étendue plus récemment à la production en fermenteurs de protéines importantes dans l'alimentation issues du lait - caséine, lactoglobulines - ou de l'œuf - comme l'ovalbumine. Ces protéines, après purification, sont conditionnées pour ressembler à des produits conventionnels. En janvier 2023 le Groupe Bel a commercialisé sur le marché américain « *Nurishh Incredible Dairy* », un fromage blanc contenant des protéines laitières ne provenant pas du lait, mais obtenues par fermentation de précision. Il s'agit essentiellement de lactoglobulines, résultat de leur partenariat avec la start-up californienne Perfect Day. En France la start up Standing Ovation produit de la même façon la caséine, une protéine majeure du lait, base de fromages qu'elle commence à écouler sur le marché américain en utilisant comme argument marketing : un produit sans lactose ne provenant pas d'animaux, ayant même goût, même arôme et même texture que les fromages conventionnels. Au niveau mondial,

7 « Aliments cellulaires : être vigilant pour mieux encadrer et maîtriser la technologie » : rapport d'information du Sénat n° 504 (2022-2023) déposé le 5 avril 2023. <https://www.senat.fr/rap/r22-504/r22-504.html>.

une cinquantaine de start-up travaillent dans le secteur avec des investissements très importants aux USA (apports financiers en 2021 de plus d'un milliard 500 millions de dollars). En Europe, aucune demande d'autorisation de commercialisation n'a été encore déposée. La qualification OGM ou dérivant d'OGM pourrait s'avérer un problème. Au-delà, d'une manière générale, les dépenses énergétiques et celles liées aux milieux de culture des bactéries modifiées (glucides issus de betterave, maïs, canne à sucre...) doivent être affinées pour apprécier la compétitivité des procédés. La connaissance d'autres gènes (protéines du muscle par exemple) ou mêmes gènes synthétiques codant pour des protéines parfaitement équilibrées permet d'envisager une extension de cette approche. Le pas a été franchi par la société américaine RethinkX, un think tank spécialisé dans les perspectives en rupture. Dans un rapport très documenté⁸ de plus de 70 pages intitulé « *Rethinking food and agriculture 2020-2030* » ce groupe envisage le remplacement complet de l'élevage des ruminants par la fermentation de précision à grande échelle. Selon le scénario envisagé, les protéines obtenues seraient de meilleure qualité et moins chères que les protéines animales (viande, lait...) en utilisant cent fois moins de terres agricoles, quinze fois moins de matières premières et dix fois moins d'eau. Les impacts sur l'environnement seraient favorables avec une réduction des gaz à effet de serre et la création de puits de carbone par reforestation des terres libérées par l'élevage. L'effondrement des activités associées à l'élevage et aux industries de la viande serait compensé par la création d'emplois associés au fonctionnement des fermes à fermentation nouvellement créées. Ce type de scénario dont la dimension technique de base apparaît acceptable, demanderait à être validé sur les plans des dépenses d'énergie et de nutriments pour la croissance des micro-organismes, et sur la faisabilité des extensions d'échelle nécessaires. En raison des bouleversements profonds qu'il induirait, il ne pourrait être envisagé que dans des cas de crise climatique extrêmement grave et devant l'échec d'autres stratégies. La proposition avancée met l'accent sur l'efficacité supérieure des micro-organismes en matière de conversion des nutriments en protéines par rapport aux ruminants. Ceci est exact mais ne prend pas en compte la capacité unique des ruminants à valoriser des fibres végétales en protéines (avec un faible rendement certes), fibres qui ne peuvent être utilisées par l'alimentation humaine, et aussi leur aptitude à occuper des espaces naturels peu propices à l'agriculture.

Éléments de conclusion

Notre époque, période de grandes mutations, se trouve confrontée à un défi important : répondre à la demande en protéines d'une population croissante. Cette situation appelle de nouvelles réflexions et innovations dans les domaines de l'agriculture et de nos comportements alimentaires.

Un certain nombre de constats s'imposent. La forte pression démographique qui prévoit 10 milliards d'individus sur la planète en 2050 entraînera naturellement une augmentation de la demande en protéines. Certains pays souffrent déjà de carences en protéines, particulièrement au niveau des enfants, et l'occidentalisation des modes de vie s'accompagne dans les pays en développement d'une plus grande consommation de produits animaux. À l'inverse, on observe un engagement des jeunes générations

8 <https://www.rethinkx.com/food-and-agriculture>.

des pays développés en faveur d'un système alimentaire limitant les protéines animales, plus respectueux de la planète et du bien-être animal.

Nous allons vers une artificialisation croissante de l'alimentation, le burger représente déjà un exemple de produit « désanimalisé » et les plats préparés commercialisés s'éloignent des sources naturelles des aliments. On observe par ailleurs une explosion des investissements dans le secteur des protéines alternatives pouvant compléter ou remplacer les sources de protéines traditionnelles. La France est peu présente dans ces filières (à l'exception des protéines d'insectes) et d'une manière générale peu ouverte à de nouveaux produits.

Face à ces constats, des mesures globales s'imposent à l'échelle mondiale pour répondre tout d'abord aux besoins de base en protéines des populations les plus défavorisées. Dans les pays développés, un nouvel équilibre entre protéines animales et protéines végétales doit être atteint. On peut prendre ici comme objectif l'ambitieux « *planetary health plate* » de *The Lancet*. Pour accroître les disponibilités en protéines, différentes stratégies peuvent être envisagées. Dans l'élevage des ruminants reconsidérer l'utilisation des tourteaux de protéines végétales dont le taux de conversion en protéines animale est très faible. Ceci peut passer par le retour à un élevage herbager bien conçu et dégagerait une masse très importante de protéines de soja ou d'autres protéagineux pour l'alimentation humaine. Favoriser la consommation de protéines végétales par la commercialisation de plats végétariens cuisinés et appétents qui ne visent pas à mimer, comme à présent, l'alimentation carnée existante. Exploiter les protéines alternatives qui découlent de différentes filières très innovantes présentées plus haut. Au-delà d'une qualité nutritionnelle, d'une sécurité nutritionnelle et d'une sécurité sanitaire reconnues, les produits qui en dérivent devront atteindre les objectifs suivants : présenter un goût attractif et des prix à peu près équivalents aux produits conventionnels, répondre à des critères de durabilité (consommation énergétique, émission de GES), franchir les barrières réglementaires qui diffèrent significativement selon les pays et sont particulièrement strictes en Europe, bénéficier d'une acceptabilité des consommateurs qui varie beaucoup selon l'âge et les régions.

La complexité du système alimentaire et les différentes dimensions qu'il englobe, biologique, économique, sociologique, religieuse, hédonique, souveraineté..., rend difficile de prévoir ce que sera notre panorama alimentaire en matière de protéines dans une dizaine d'années. Les protéines alternatives vont-elles bénéficier d'une dynamique mondiale entraînant l'Europe et la France, ou se limiteront-elles à des effets de mode ? La confrontation des freins culturels aux innovations et aux impératifs climatiques et humanitaires sera sans doute importante comme le montrent les positions récentes du Sénat français ou du gouvernement italien. Certains indices comme la chute en Bourse de l'action de la société Beyond Meat semble aussi indiquer qu'après une phase d'excitation on observe une certaine période de désillusion... Le secteur en général devra bénéficier d'améliorations technologiques et enregistrera aussi vraisemblablement des ruptures inattendues comme les promesses de la société Solar Foods⁹ en Finlande qui obtient une farine protéinée, la « soléine », par culture de bactéries hydrogénotrophes¹⁰ capables de métaboliser l'hydrogène en présence de CO₂, d'eau et de sels minéraux pour

9 <https://solarfoods.com>.

10 « Les hydrogénotrophes sont des organismes capables de métaboliser l'hydrogène comme source d'énergie » : cf. Wikipedia.

donner de la matière organique protéinée. L'Europe a accordé de fortes subventions à cette start-up qui devra préciser les besoins énergétiques du procédé qui met en jeu l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène, et les possibilités d'extension pour la production à grande échelle. La soléine est déjà autorisée à Singapour et des demandes de commercialisation ont été déposées aux USA et en Europe. Quelle que soit la nature de la transition protéique, la dimension symbolique de l'aliment demeurera un critère déterminant selon le mot du célèbre anthropologue Claude Lévi-Strauss : « *Il ne suffit pas qu'un aliment soit bon à manger, encore faut-il qu'il soit bon à penser* ». Effectivement et particulièrement dans des pays comme la France, l'alimentation n'est pas qu'une affaire de besoins nutritionnels, c'est encore du lien social, du plaisir, de la culture.