

Chimie et alimentation



Christian Campargue
Margaux Cavailles
Claire A. de March
Romain Joly
Georges Kass
Jean-Michel Lecerf
Gino Mangiante
Bernard Meunier
Verena Poinso
Philippe Pointereau
Mathis Puech
Hervé This

*Coordonné par
Danièle Olivier
et Paul Rigny*



Chimie et alimentation



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et eau »
qui s'est déroulé le 12 février 2025 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Philippe Gœbel

Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Chimie et alimentation

Christian Campargue, Margaux Cavailles, Claire A. de March, Romain Joly,
Georges Kass, Jean-Michel Lecerf, Gino Mangiante, Bernard Meunier,
Verena Poinso, Philippe Pointereau, Mathis Puech, Hervé This

Coordonné par Danièle Olivier et Paul Rigny

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
EDP Sciences

Crédits couverture :

Images : © Hervé THIS – Adobe Stock : © Ruslan Batiuk –
© Nuttaya Nampai – © veiksme – © Curioso.Photography –
© HadK

Mise en pages et couverture : Christine Porchat
Conception graphique, visuel du colloque : CB Defretin

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3874-5

ISBN (ebook) : 978-2-7598-3875-2

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© 2026 – Fondation de la Maison de la Chimie

Fondation de la Maison de la Chimie
28, rue Saint-Dominique
75007 Paris, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Christian Campargue

Directeur des sciences
analytiques au centre
de recherche de Danone

Margaux Cavailles

Responsable de
la création aromatique et
du développement stratégique
chez MANE

Claire A. de March

Experte en biologie cellulaire
et biochimie au service de
l'étude de l'olfaction, chargée
de recherche au CNRS, Institut
de chimie des substances
naturelles, Université Paris-
Saclay

Romain Joly

Directeur de l'entité
des protéines alternatives de
la société Roquette

Georges Kass

Ancien expert principal –
EFSA (European Food Safety
Authority)

Jean-Michel Lecerf

Médecin, spécialiste
en endocrinologie, maladies
métaboliques et nutrition –
Ancien directeur médical et
chef du service de nutrition
de l'Institut Pasteur de Lille,
membre correspondant
de l'Académie d'agriculture
de France, section
Alimentation

Gino Mangiante

Expert R&D produits
et technologies des
hydrocolloïdes chez CARGILL

Bernard Meunier

Directeur de recherche
émérite au CNRS, membre
de l'Académie des sciences
et de l'Académie nationale
de pharmacie

Verena Poinso

Directrice de recherche
première classe CNRS – Centre
interuniversitaire de recherche
et d'ingénierie des Matériaux
(CIRIMAT)

Philippe Pointereau

Membre fondateur
de l'association Solagro,
administrateur de l'AFA
(Association française
d'agronomie), président de
la fondation Terre de Liens
et de l'Institut Agro-Campus
de Florac

Mathis Puech

Doctorant à l'Institut de chimie
des substances naturelles
(ICSN, CNRS), sous la direction
de Claire de March

Hervé This

Physico-chimiste, directeur
du Centre international
de gastronomie moléculaire
et physique AgroParisTech-
INRAE, directeur de
la Fondation Science & Culture
alimentaire de l'Académie
des sciences, membre
de l'Académie d'agriculture
de France, membre
correspondant de l'Académie
royale des sciences, des lettres
et des beaux-arts de Belgique

Équipe éditoriale :

Danièle Olivier
et Paul Rigny

Sommaire

Avant-propos, par Paul RIGNY	9
Préface, par Danièle OLIVIER	13

Partie 1 : L'alimentation a forgé l'espèce humaine et est indispensable à sa survie

Chapitre 1 : Manger, hier, aujourd'hui, demain... en chimie par Hervé THIS	19
--	----

Chapitre 2 : Chimie, biologie, métabolisme : le trio gagnant pour comprendre la nutrition. L'exemple des acides gras par Jean-Michel LECERF	47
--	----

Chapitre 3 : La souveraineté alimentaire en France par Philippe POINTEREAU	59
--	----

Partie 2 : Bien manger

Chapitre 4 : Quelles sources d'avenir pour les protéines alimentaires ? par Verena POINSOT	87
--	----

Chapitre 5 : Les protéines végétales, catalyseurs d'innovation pour une alimentation durable par Romain JOLY	97
---	----

Chapitre 6 : Les secrets de l'olfaction – Voyage au cœur du sens de l'odorat par Claire A. de MARCH et Mathis PUECH	109
---	-----

Chapitre 7 : Les métaux dans l'alimentation : un bienfait ou un danger ? d'après la conférence de Bernard MEUNIER ...	125
---	-----

Partie 3 : L'industrie alimentaire ne cesse de progresser

Chapitre 8 : La compréhension moléculaire au service d'une alimentation innovante par Christian CAMPARGUE	143
---	-----

Chapitre 9 : Quand la chimie et les arômes réinventent l'alimentation de demain d'après la conférence de Margaux CAVAILLES ...	157
--	-----

Chapitre 10 : Les texturants, une aide pour la nutrition des seniors par Gino MANGIANTE	169
---	-----

Chapitre 11 : La sécurité sanitaire des aliments par Georges KASS	179
---	-----

Avant-propos

Qu'est-ce qui dérange le simple consommateur de repas dans nos sociétés modernes ? La disponibilité de sa nourriture à un prix raisonnable, d'abord, la qualité de la cuisine qu'on lui prépare ou qu'il se prépare, voilà certainement l'essentiel. Mais il veut aller plus loin : de plus en plus, il considère que santé et alimentation sont indissociables – au point que le mot « bon » a maintenant deux significations intriquées, l'une gustative, l'autre sanitaire ! – et il veut que les aliments soient compatibles avec sa bonne santé. Par ailleurs, il pense toujours fortement à son portefeuille et veut manger bon marché !

Tout cela est tellement évident que nos sociétés se sont efforcées – et sauf situations exceptionnelles –, avec succès, de le satisfaire sur ces exigences considérées comme « élémentaires ». Et ce depuis fort longtemps – qu'on regarde les pratiques si anciennes de la salaison, de la fermentation, etc. : elles sont toujours en exercice.

Et c'est toujours ce cadre qui domine à l'ère de la technique et de la science du ^{xxi}^e siècle qui a conquis le champ de

l'alimentation. Plus précisément, d'abord on veut toujours mieux – meilleur, moins cher, plus varié. L'homme (ou la femme) est ainsi fait. Ensuite, on refuse obstinément tout risque à la santé. Toujours, on a pu déplorer des empoisonnements, à l'échelle individuelle ou, spectaculairement, à celle des épidémies, mais plus la science progresse, plus on la rend responsable de ces malheurs. En troisième lieu, pour l'alimentation comme pour tant de domaines, on souffre de l'explosion démographique ; elle menace la diversité des ressources alimentaires et la rareté de l'eau elle-même qui rendrait la vie impossible sur Terre.

La Maison de la Chimie a organisé en 2013 un premier colloque sur « Chimie et Alimentation » identifiant déjà ces évolutions. Traités de façon responsable par les autorités, les problèmes évoqués ci-dessus étaient déjà identifiés et pris en charge du mieux possible à l'époque. Mais l'histoire s'est accélérée : tous les critères ont bougé et il faut revenir sur le thème dans ce nouveau colloque « Chimie et Alimentation 2025 ».

Le changement climatique et l'explosion de la démographie étaient effectivement perçus il y a dix ans – mais ils n'ont pas assez convaincu. Sous bien des aspects, on est passé de prévisions à des réalisations, de conjectures aux catastrophes : les meilleurs prophètes sont rattrapés par les réalités. Le phénomène scientifique a aussi joué son rôle et a accéléré les prises de conscience : la chimie analytique (appuyée sur l'IA) gagne chaque année considérablement en performances et vient déstabiliser tout ce qui est « analyse de risque » et « modélisations de la nature ». Ces travaux font apparaître des décisions concrètes qu'il ne faut plus repousser, même si elles restent souvent impossibles à comprendre en détail et à mettre en œuvre. Qui prendra l'initiative de l'enfer du choix qui se profile et se matérialise ?

Évolution logique des thématiques entre nos deux colloques sur « Chimie et Alimentation » de 2013 et de 2025 : en douze ans, les priorités se sont affirmées. On parle un peu moins de ce qui se passe dans l'assiette, un peu moins de chimie moléculaire – domaines en pleine vigueur –, un peu plus des ressources agricoles et plus de techniques passées dans ce domaine, du stade projets au stade réalisations pour, par exemple, préserver ce que l'on peut en matière d'eau réutilisable.

Les priorités scientifiques de 2013 sont toujours là mais il s'en ajoute d'autres. Et l'attitude « recherche scientifique exploratoire » se complète par

« développement de nouvelles démonstrations pratiques ». Aucun champ de ces études ne doit être ralenti.

On verra dans le présent colloque comment la connaissance des mécanismes intimes de l'alimentation a progressé, et la compréhension de leur prévention et de la disponibilité de nouvelles ressources est devenue réaliste (les arômes, les algues, les métaux rares...). On verra dans tous les domaines l'implication croissante des laboratoires industriels à côté de la recherche académique – signe de leur maturité.

Bien que toutes ces préoccupations soient très anciennes, l'intérêt qu'elles suscitent ne se dément pas. S'agit-il d'un réflexe de peur de la part de nos sociétés ? De confiance dans les capacités croissantes de la science ? Est-ce le début de priorités universelles qui prennent place à côté des querelles purement humaines dont souffrent nos sociétés ?

D'une manière comme d'une autre, les laboratoires de recherche continueront à s'impliquer de plus en plus dans ce thème « Chimie et Alimentation », comme ce sera le cas pour les thèmes qui leur sont reliés que sont l'environnement, la gestion des ressources agricoles ou minières. Les hommes politiques d'autrefois considéraient ces thèmes comme « accessoires », ceux des années qui viennent les réaliseront comme d'importance vitale.

Tous les chapitres issus du présent colloque seront publiés sur le site mediachimie.org

publié par la Fondation de la Maison de la Chimie. L'expérience d'une vingtaine d'années que nous avons sur ce site montre que les chapitres répondent largement aux questions qui intéressent le monde enseignant – fin des classes des lycées et début de l'enseignement supérieur. Tous les lecteurs apprécient

de façon concrète l'intérêt de la chimie pour poser, analyser et résoudre pratiquement les problèmes posés par les évolutions si importantes et si rapides de notre civilisation.

Paul Rigny

*Conseiller du président
de la Fondation de la Maison
de la Chimie*

Préface

L'alimentation a forgé l'espèce humaine et est étroitement liée à sa survie, à son évolution sanitaire, sociale, économique et culturelle. Ces points fondamentaux sont illustrés par les trois chapitres de la première partie de cet ouvrage.

Hervé This nous montre, à travers la fresque historique « **manger bien, hier, aujourd'hui et demain vu de la chimie** », comment la transformation des aliments et le stockage des denrées, d'abord empiriques, ont évolué d'une merveilleuse manière grâce à la compréhension et à la maîtrise de la chimie de l'alimentation pour développer le plaisir de nos sens et valoriser les nutriments. Mais que mangerons-nous demain quand il y aura dix milliards d'individus à nourrir ?

La nutrition, qui a pour objet de comprendre les mécanismes métaboliques qui permettent à l'organisme de s'adapter en permanence pour satisfaire nos besoins nutritionnels et nous maintenir en bonne santé, est une discipline pluridisciplinaire et complexe dans laquelle la chimie joue un rôle important. **Jean-Michel Lecerf**, à partir des exemples du métabolisme des acides

gras (oméga 6 et oméga 3) et du cholestérol, illustre les processus mis en œuvre par l'organisme pour maintenir stables ces équilibres.

La souveraineté alimentaire est un sujet d'actualité sur lequel **Philippe Pointereau** fait le point au niveau national dans un contexte international particulièrement difficile sur les plans environnemental, scientifique et politique. Son exposé est illustré par des données officielles.

La seconde partie « Bien manger » a pour objectif de mieux comprendre les choix nutritionnels, ludiques et sanitaires que nous devons faire.

Bien que les protéines animales contiennent les acides aminés essentiels et les autres nutriments (fer, zinc et vitamine B12) indispensables à notre nutrition et qu'elles présentent un excellent taux de digestibilité, les considérations environnementales, sanitaires et l'accroissement de la demande mondiale imposent la recherche d'alternatives.

Véronique Poinot fait l'examen des sources d'avenir les plus crédibles pour les

protéines alimentaires et compare insectes, végétaux, levures, champignons filamenteux et microalgues. Elle compare les aspects nutritifs, l'acceptabilité, l'impact et le potentiel de développement à moyen terme.

Parmi les ressources les plus crédibles se trouvent les végétaux, et les protéines végétales sont traitées en détail dans le chapitre de **Romain Joly** qui permet de découvrir ces protéines et expose les développements et innovations réalisés depuis une vingtaine d'années.

Bien manger, c'est manger avec plaisir, et le chapitre de **Claire de March** nous montre l'immense rôle que joue l'olfaction dans ce domaine. À travers «**les secrets de l'olfaction, voyage au cœur du sens de l'odorat**», nous comprenons le fascinant parcours d'une odeur, de sa source à sa perception consciente par notre cerveau, et les mécanismes à la fois chimiques et neurologiques de ce champ d'études en pleine expansion qui mêle la science et l'exploration sensorielle.

Le dernier chapitre de cette seconde partie montre que, malgré leur très faible taux dans notre corps, les métaux jouent un rôle important, et **Bernard Meunier** va faire le point sur la question. Est-ce un bienfait ou un danger ?

Au-delà du rôle connu du fer, nous avons besoin, souvent à l'état de traces, de zinc, de cobalt, de cuivre, de molybdène, de sélénium, regroupés sous l'appellation «**oligoéléments**». Il explique comment, grâce à des systèmes

de régulation, le corps humain contrôle la concentration de ces oligoéléments alors que nous sommes mal équipés pour éliminer les métaux toxiques comme le plomb et le mercure.

La troisième partie a pour objet, sur quelques exemples donnés par de grands groupes, de montrer que l'industrie alimentaire ne cesse de progresser, avec les besoins d'innovation sous-jacents et les perspectives d'avenir pour les jeunes.

Christian Campargue, pour le groupe Danone, permet de comprendre, sur des exemples, que la compréhension moléculaire, donc la chimie, est indispensable pour concevoir une alimentation innovante. À partir de l'exemple des diverses variétés de yaourts, il présente la complexité et la diversité de cette chimie où la structure moléculaire, la fonctionnalité des polymères, la disposition des composés volatils, les processus industriels, la caractérisation fine des ferments sont indispensables pour comprendre et maîtriser la perception sensorielle des produits et répondre aux préférences des consommateurs. Derrière un petit pot de Danone, c'est toute une chimie associée aux techniques structurales les plus modernes qui est mobilisée.

Il en est de même pour **les arômes** pour lesquels **Margaux Cavailles** souhaite, sur des exemples, prouver que, dans le groupe Mane, la chimie des arômes réinvente l'alimentation de demain.

Comme pour les parfums, la chimie est essentielle pour la création des arômes. Elle permet de reproduire des composés essentiels, mais également de répondre aux attentes des consommateurs en développant des solutions innovantes pour les grandes marques d'aliments ou de boissons.

Les additifs texturants sont largement utilisés dans le domaine alimentaire et cosmétique. **Gino Mangiante**, du groupe Cargill, présente une application innovante des texturants alimentaires mise au point pour répondre aux difficultés rencontrées pour la nutrition des seniors atteints de dysphagie (trouble de la déglutition).

La sécurité sanitaire des aliments est très contrôlée en Europe. **Georges Kass** présente les travaux de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) pour laquelle l'évaluation de tous les produits chimiques ainsi que ceux d'origine naturelle contenus dans les aliments constitue une mission importante. À partir d'exemples, il montre les développements méthodologiques actuels et les nouveaux défis venant des nouveaux types d'aliments mais aussi de l'environnement.

Les chapitres de cet ouvrage seront déclinés :

- en fiches pédagogiques : les fiches «Chimie et...» adaptées au programme du secondaire et validées par la DGESCO ;
- en fiches directement utilisables en classe, pour les filières générales et professionnelles et pour la préparation du grand oral du baccalauréat. Ces «fiches Nathan» sont réalisées en partenariat avec les équipes pédagogiques des éditions Nathan.

L'ensemble de ces ressources est gratuitement accessible sur notre médiathèque www.mediachimie.org.

L'information scientifique objective du public et l'aide à la formation des jeunes et à leur orientation professionnelle font partie des missions principales de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie. Nous espérons que cet ouvrage y contribuera.

Je vous souhaite une bonne lecture.

Danièle OLIVIER

*Vice-présidente de la Fondation
internationale de la Maison
de la Chimie
Présidente du comité
d'organisation des colloques
de la série : «Chimie et...»*

Partie 1

L'alimentation a forgé
l'espèce humaine et
est indispensable
à sa survie

Manger, hier, aujourd'hui, demain... en chimie

Hervé This, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire et physique AgroParisTech-INRAE, directeur de la Fondation Science & Culture alimentaire de l'Académie des sciences, membre de l'Académie d'agriculture de France, membre correspondant de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique. Il vient de recevoir le prix Sonning (Danemark).

Introduction

Les jésuites disaient qu'il faut se comporter en chrétien, et non en tant que chrétien : de même, je propose de nous intéresser ici à l'alimentation en chimiste pour cet ouvrage issu du colloque « Chimie et alimentation ». Quand on parle de chimie, il faut immédiatement ajouter qu'il y a beaucoup de confusion à propos de la « chimie », dans le public,

mais aussi dans le monde de la chimie et de ses applications. La chimie est une science de la nature, qui est apparue entre le premier et le quatrième tome de l'*Encyclopédie* de Denis Diderot et Jean Le Rond d'Alembert (Kahn, 2016). Par le passé, il y avait l'alchimie, dont la branche non ésotérique (celle qui évitait les prétendues pierres philosophales, transmutations du plomb en or, etc.) explorait les transformations

de la matière qu'opéraient les métallurgistes, les cuisiniers, les fabricants de savons et autres produits cosmétiques, les pharmaciens...

Progressivement, les sciences physiques modernes s'étant développées après la Renaissance, le même esprit de modernité non dogmatique souffla sur les activités d'exploration des transformations de la matière : au lieu de penser qu'une « expérience qui rate » est due à l'insuffisance de l'expérimentateur, on finit par comprendre que les résultats des expériences s'imposent absolument, quelles que soient les « autorités » qui s'y opposeraient, et ce fut la « chymie », qui devint la « chimie » quand Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) (**Figure 1**) lui donna les bases quantitatives que toute science moderne ne manque pas d'avoir ; quand, dans un même mouvement, il réfuta la théorie du phlogistique (une matière de masse négative qui aurait été donnée par le feu, lors des

calcinations), lorsqu'il introduisit des méthodes modernes quantitatives d'analyse, quand il proposa une meilleure définition de la notion d'« élément », quand il proposa avec quelques collègues une rénovation du langage de la chimie.

Comme les autres sciences de la nature, la chimie a eu et a pour fonction de découvrir les objets du monde, d'explorer les mécanismes des phénomènes. La méthode est donc celle qu'introduisirent François Viète (1540-1603), René Descartes (1596-1650) (à qui nous devons beaucoup de notre formalisme algébrique), Francis Bacon (1561-1626) et surtout Galilée (1564-1642), qui put énoncer bien plus clairement les choses. Et c'est ainsi que l'expérience devient première, assortie du calcul, et que l'on rompit alors avec les études anciennes, dogmatiques : Galilée écrivait très clairement que « *la philosophie [de la nature, c'est-à-dire la science] est écrite dans le grand livre qui se tient ouvert devant nos yeux – je veux dire l'univers –, mais nous ne pouvons le comprendre que si nous apprenons le langage et les symboles dans lequel il est écrit. Ce livre est écrit en langage mathématique, et les symboles sont les triangles, cercles et autres figures géométriques, sans l'aide desquelles il est impossible d'en comprendre un seul mot* ». Progressivement, on a donc compris que les méthodes des sciences de la nature consistent en :

1. l'identification d'un phénomène ;
2. la caractérisation quantitative de ce dernier ;



Figure 1

Antoine Laurent de Lavoisier dans son laboratoire.

Crédit : H. This.

3. la réunion des données de mesure en équations ;
4. la réunion d'équations et l'introduction de concepts pour former une théorie ;
5. la recherche de conséquences théoriques testables de la théorie ;
6. tests expérimentaux de ces prévisions théoriques.

La chimie s'est ensuite développée, irriguant les techniques d'application tirées des nouvelles connaissances. J'insiste : on a tort de confondre la chimie avec les applications de la chimie, de confondre la science avec ses applications, et, à ce propos, on se rappellera les mots de Louis Pasteur (1822-1895), qui répétait, jusqu'à la colère, qu'il n'existe pas de « sciences appliquées », expression auto-contradictoire, mais seulement des applications des sciences. Le travail de l'ingénieur qui utilise les résultats de la chimie n'est pas de la chimie, puisqu'il ne s'agit pas d'un travail scientifique, mais technologique, et l'on gagne à avoir une idée claire des champs désignés par la technique (du grec *techné*, « faire »), le technologique (l'étude de la technique en vue de son amélioration), l'ingénierie (les procédés, l'orchestration des études techniques) et la science, sous-entendu « de la nature », laquelle se préoccupe de découvertes, et non d'inventions.

1 Hier

Tout cela étant dit, nous pouvons examiner plus clairement l'évolution de l'alimentation, à

partir de l'aube de l'humanité, dont nous avons une vision par les études zoologiques ou paléanthropologiques, entre autres. Notamment les travaux de nos collègues (Hladik, 1977) ont bien établi que les végétaux ont coévolué avec les animaux, produisant notamment des nutriments dans des baies colorées et riches en sucres (essentiellement D-glucose, D-fructose et saccharose) (Figure 2), « afin » que les animaux consomment ces baies et aillent disperser les graines au loin, évitant ainsi que les rejetons d'une plante soient en concurrence avec la plante mère.

Les primates non humains, par exemple, ont consommé non seulement les baies, mais également les tiges ou les racines, qui contiennent des oligo- ou des polysaccharides, et des acides aminés. Car les plantes

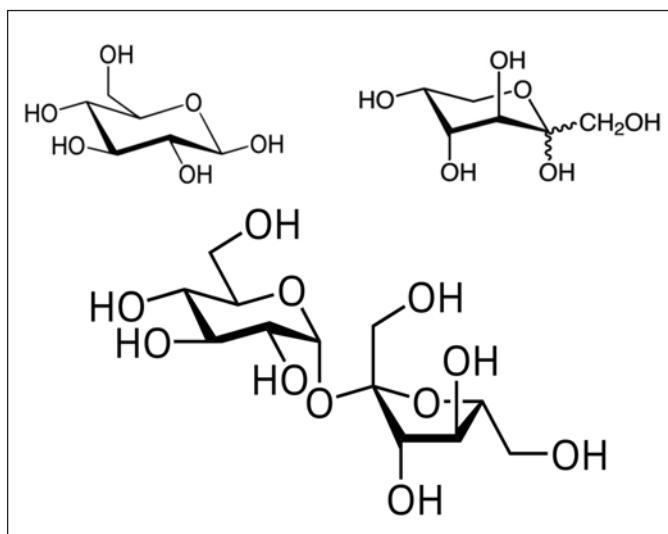


Figure 2

Formules du D-glucose (en haut, à gauche), du D-fructose (en haut, à droite) et du saccharose (en bas), composés présents dans tous les végétaux.

ont des canaux conducteurs qui montent la sève brute (essentiellement de l'eau et des minéraux) vers les feuilles, grâce à l'évapotranspiration, qui assure une montée de la sève par capillarité, dans les canaux du tissu conducteur des plantes (xylème, phloème). Puis, dans les feuilles, s'effectue la synthèse organique de nombreux composés organiques, à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère et de l'énergie lumineuse ; les composés synthétisés sont redescendus dans la plante par les canaux du phloème, jusque dans les racines (notamment), où les oligosaccharides (les « petits sucres », lessivables parce que solubles) sont associés en polysaccharides stockés (par exemple, l'amidon des tubercules de pommes de terre) (**Figure 3**).

Pas étonnant, alors, que les pucerons, avec leur rostre,

piquent les tiges des plantes et aillent aspirer les sucres et les acides aminés présents dans les canaux du phloème, se gonflant... jusqu'à être « traits » par les fourmis, qui récupèrent ces précieux composés organiques dans le miellat (substance déposée sur les feuilles). Les singes, également, mastiquent tiges et racines, pour extraire ces composés qui sont de l'énergie sous la forme chimique, notamment le D-glucose, le D-fructose et le saccharose, stockés sous forme non lessivable d'amidon dans les racines et les graines (les tubercules de pomme de terre, les grains de blé, de maïs, etc.).

Veut-on voir quels ingrédients contiennent de l'amidon ? Une goutte de teinture d'iode, brune, vire au bleu quand elle est déposée sur de l'amidon, parce que les atomes d'iode viennent se loger au cœur des hélices d'un des deux composés de l'amidon : l'amylose (l'autre a pour nom « amylopectine »). Évidemment, il y a une réaction dans cette affaire et cela relève de cette branche de la chimie qui est dite « supramoléculaire ».

Il faudrait des volumes entiers pour décrire l'alimentation des primates, qui fut celle de nos lointains ancêtres, et nous nous arrêterons seulement sur quelques exemples, qui illustrent cette idée importante selon laquelle « *tout ce qui relève du vivant doit s'interpréter en termes de biologie de l'évolution* » (Dobzhansky, 1973).

Tout d'abord, il est intéressant d'observer que les singes ont progressivement acquis

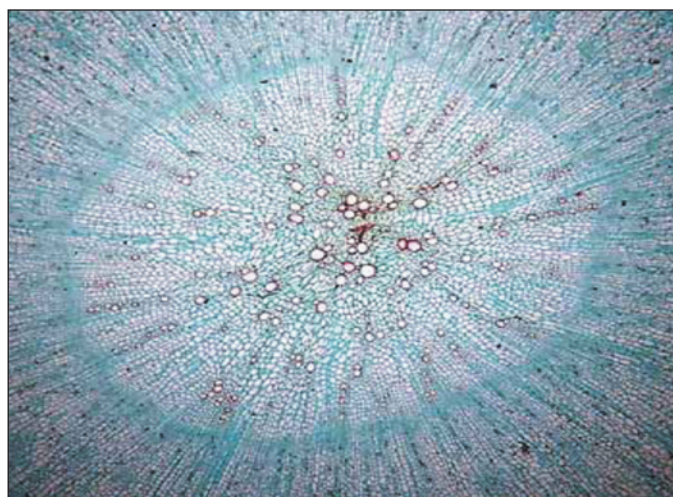


Figure 3

Coupe transversale d'une racine de *Daucus carota* L. (« carotte »). Les petits ronds blancs centraux correspondent aux canaux du xylème et du phloème.

– génétiquement – la capacité de métaboliser l'éthanol, formé par fermentation des fruits sucrés : cette adaptation favorable s'est transmise, parce qu'elle permettait de mieux valoriser les ressources, et elle nous a été aussi transmise.

Dans ce registre des mutations utiles, enchaînons avec une découverte récente (2022) d'Evershed qu'une mutation est apparue dans les pays du nord de l'Europe, entre -10 000 et -5 000 ans : elle a permis à des groupes humains de métaboliser le lactose du lait, un disaccharide (**Figure 4**) qui n'était assimilable que par les nourrissons, les adultes ne pouvant consommer le lait que sous la forme de yaourts, après que des micro-organismes avaient transformé le lactose non assimilable en acide lactique.

Mais nous sommes allés trop vite, car nous n'avons pas encore considéré que **la maîtrise du feu**, à une époque sans doute comprise entre 800 000 et 400 000 avant notre ère (Gowlett *et al.*, 1981), **a constitué un progrès essentiel, parce que la « cuisson » a des fonctions nombreuses :**

– elle détruit les micro-organismes pathogènes, qui contaminent toujours la surface des denrées (on n'oublie pas que les micro-organismes ont les mêmes besoins que nous, à savoir la présence d'eau, de nutriments et une température suffisamment chaude pour permettre leur prolifération, mais suffisamment froide pour ne pas inactiver les enzymes nécessaires à leur métabolisme) ;

– elle tue les parasites qui contaminent éventuellement l'intérieur ou l'extérieur des denrées (porc, cheval, poissons, cresson, etc.) ;

– elle permet de dégrader des composés toxiques des ingrédients alimentaires, telles certaines lectines (des protéines) hémato-agglutinantes des haricots ;

– elle dissocie des composés non directement assimilables (par exemple, les amyloses et les amylopectines de l'amidon,

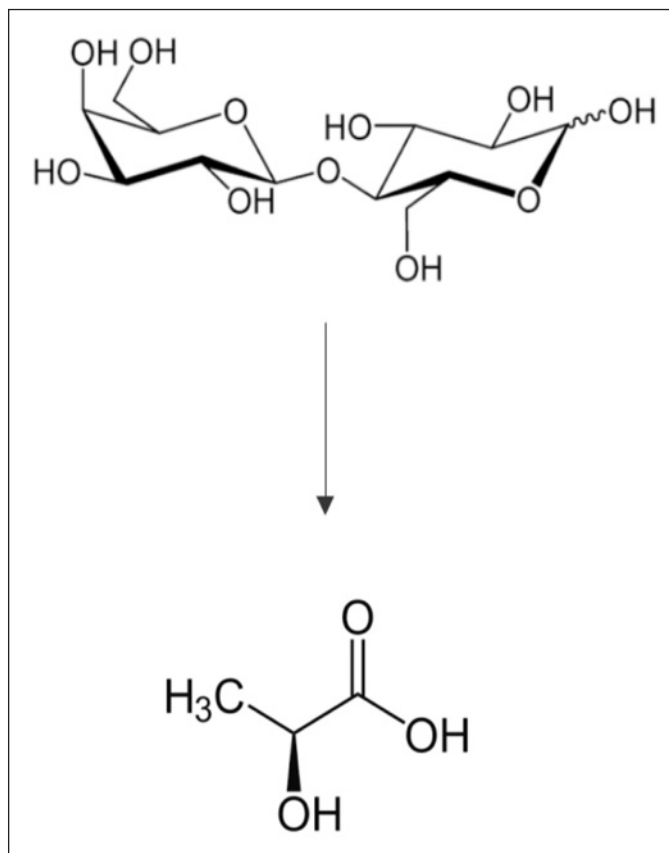


Figure 4

Le lactose (en haut), sucre présent dans le lait, est un disaccharide composé d'un résidu de galactose et d'un résidu de D-glucose. Dans les yaourts, des micro-organismes le transforment en acide S-lactique (en bas).

les pectines des parois cellulaires, les protéines), formant des composés qui peuvent passer rapidement dans le sang ;

- elle modifie la consistance des denrées, tels les tissus végétaux, facilitant l'assimilation, et augmentant la bioactivité des composés qui sont présents (par exemple, le bêta-carotène des carottes, notamment, est bien plus assimilé à partir d'une purée de carottes qu'à partir d'une carotte crue) ;

- elle engendre des composés odorants et sapides appréciés des humains et des animaux (des singes préfèrent des carottes cuites à des carottes crues, par exemple) ;

- elle engendre des composés qui, détectés par le système sensoriel, servent de signaux pour établir la satiété (par exemple, les acides aminés pour les viandes) ;

- et l'on n'a sans doute pas fini d'identifier l'intérêt des modifications chimiques des denrées alimentaires par le feu.

Si le feu a favorisé l'évolution de l'humanité, en lui évitant de passer trop de temps à mastiquer, il n'est pas le seul facteur : nos ancêtres ont cherché à ne plus être tributaires des variations climatiques, annuelles ou à une échelle supérieure (Labalette, 2009 ; Miller *et al.*, 2012) grâce à **l'agriculture, la pêche et l'élevage**. Dans ces développements, il s'agissait d'assurer la « **sécurité sanitaire** » (le fait d'avoir un approvisionnement alimentaire suffisant). Et **des techniques de conservation se sont empiriquement**

perfectionnées : les fromages, après tout, sont des conserves de lait ; les saucissons, les viandes en saumure ou les viandes et poissons fumés sont des conserves de viande ; les confitures sont des conserves de fruits.

Dans toutes ces discussions, il y a une différence importante à faire entre la « sécurité alimentaire », déjà évoquée, et la « sécurité sanitaire des aliments » (les aliments doivent être sains) : nos lointains ancêtres n'avaient ni l'une ni l'autre, et s'ils percevaient bien l'absence de toxicité immédiate des denrées, ils n'avaient pas d'idées sur la sécurité sanitaire réelle de leurs aliments. En ces matières, la « tradition » n'est pas suffisante pour nous permettre d'éviter des aliments toxiques à long terme, surtout quand leur goût est initialement bon, tels les sels de plomb (toxiques) que les Romains utilisaient pour édulcorer les vins. C'est ainsi que le remarquable *Compendium des plantes toxiques*, publié par l'Agence européenne de sécurité sanitaire des aliments, fondé sur les travaux modernes d'épidémiologie nutritionnelle, fait état de nombre de plantes dont la consommation était « traditionnelle », alors même qu'elles sont toxiques (Efsa, 2009) : à mettre entre les mains de toutes celles et de tous ceux qui cuisinent et qui mangent !

Pour en revenir au feu, notamment, la cuisson des viandes ou d'autres denrées au-dessus du foyer conduit à la contamination des aliments par des hydrocarbures polycycliques,

fortement cancérogènes (Lijinsky et Shubik, 1964 ; Chung *et al.*, 2011). Pourquoi l'humanité a-t-elle progressivement appris à mettre les pièces à rôtir devant le feu, et non au-dessus ? Une hypothèse est de nature économique : rôtie, la viande (qui se contracte en raison de la dénaturation du tissu collagénique) perd jusqu'à plus d'un quart de sa masse, ce qui était rédhibitoire à une époque où elle était moins abondante qu'aujourd'hui (Figure 5).

En mettant la viande devant le feu plutôt qu'au-dessus, ce qui cuit tout aussi bien, vu que les rayonnements infrarouges ne sont pas sensibles à la gravité, on évitait que les jus ne soient perdus dans le feu, on pouvait les récupérer dans des « lèchefrites » placées sous la viande... et l'on évitait du même coup, inconsciemment,

le dépôt d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et autres.

Pourquoi supportons-nous que nos barbecues, le plus souvent horizontaux, soient si souvent mal conçus ? On mesure mieux le problème quand on sait qu'une viande ainsi cuite, au barbecue horizontal, peut contenir jusqu'à près de 900 $\mu\text{g/kg}$ de ces HAP dans les viandes, alors qu'il n'en est autorisé que 30 $\mu\text{g/kg}$ dans les poissons fumés commercialisés (Normand, 2007 ; Commission européenne, 2020) !

Parallèlement au rôtissage, et toujours en vue de bien récupérer les nutriments, s'est introduite **la cuisson en fosse** : on creuse une fosse que l'on tapisse d'une peau d'animal, et l'on y met de l'eau, que l'on chauffe à l'aide de pierres qui

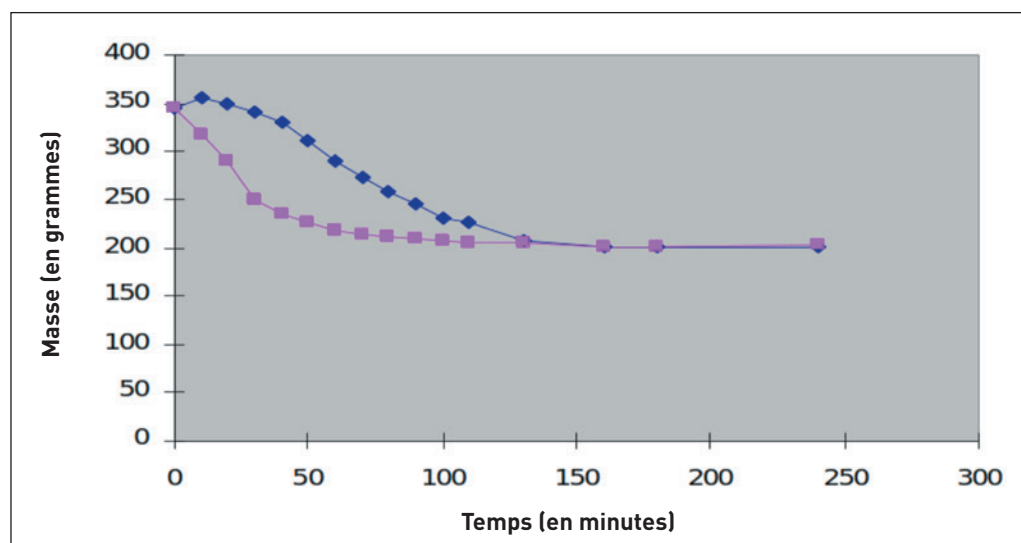


Figure 5

Chauffée, la viande se contracte, expulsant des jus. Dans l'expérience dont le résultat est donné ici, on a comparé deux moitiés égales d'une même viande, l'une placée dans l'eau bouillante (en pourpre), et l'autre dans l'eau froide (en bleu). Quand les deux pièces sont à la même température, elles ont la même masse.

sont d'abord chauffées dans un feu voisin (Wandsnider, 1997; Speth, 2015). La viande et d'autres denrées placées dans l'eau sont alors cuites, formant de surcroît un « bouillon ». Là, rien n'est perdu : on consomme à la fois les denrées initialement utilisées et le bouillon. Cela explique sans doute pourquoi le pot-au-feu et le bouillon sont universellement pratiqués, constituant la base des cuisines du monde entier, au point que les bouillons et les pots-au-feu sont au début de la plupart des livres de cuisine classique (This, 2009).

Cela étant, au cours des derniers siècles, la technique a suscité de nombreuses questions : faut-il mettre la viande dans l'eau initialement froide et chauffer ensuite, ou bien est-il préférable de mettre la viande dans l'eau qui bout déjà ? Il est intéressant d'observer que les débats ont fait rage non seulement chez les cuisiniers, mais aussi dans le milieu des chimistes qui s'intéressaient à la cuisine, sans que la question soit bien explorée scientifiquement. Pourtant, il n'est pas difficile de mettre la même viande soit dans l'eau froide, soit dans l'eau chaude, en pesant pendant la cuisson : on voit que la perte de masse est supérieure dans l'eau froide... jusqu'à ce que la viande soit dans l'eau bouillante, moment à partir duquel la masse devient exactement égale à celle de la viande mise initialement dans l'eau bouillante (environ 150 minutes) (This, 2007).

Avec le temps, la cuisine est une technique qui s'est progressivement améliorée,

notamment avec l'utilisation de pots et d'autres ustensiles de cuisine. Les études de l'histoire de l'alimentation ont bien montré que, pendant très longtemps, les pots en terre ont été les seuls récipients utilisés, avec un grave inconvénient : ils cassent (Rigault, 2022). Et c'est ainsi que l'on retrouve des quantités considérables de tessons dans les sites anciens fouillés par les archéologues. L'utilisation du fer, pour les plus fortunés, avait évidemment l'avantage d'éviter ces bris, mais avec l'inconvénient de la rouille. Le cuivre, lui, avait l'inconvénient de former du vert-de-gris, qui est parfaitement toxique : selon les cas, l'oxydation par l'atmosphère produit des hydroxy-carbonates, des hydrosulfates ou des hydrochlorures (on ne confondra pas ce vert-de-gris atmosphérique avec les acétates de cuivre utilisés comme pigment en peinture). Pour le cuivre, les instances sanitaires, soucieuses de sa toxicité, en ont réduit la quantité considérée comme admissible à 0,07 mg/kg de poids corporel (Efsa, 2023). Et nous devons nous émerveiller de la mise au point de l'acier inoxydable, qui, grâce au chrome qu'il contient, ne se casse pas, n'interagit pas chimiquement avec l'aliment. Il n'est pas le seul puisque des verres spéciaux se sont également ajoutés, mais avec une conduction thermique bien inférieure.

Avec tout cela, que mange-t-on ? Et mange-t-on différemment de ce qu'on mangeait par le passé ? L'examen des livres de cuisine anciens, tel *Le Viandier* de Guillaume Tirel, dit Taillevent (Tirel, 1319), montre

Chapitre de poisson d'eau douce

Le bar.

Cuit en eau et sel, mengiés à la sauce verte.

Sauce verte.

Prennés pain, persil, gingembre, broiés bien et deffaites de verjus et de vin aigre.

Figure 6

La recette de bar donnée par le cuisinier Guillaume Tirel, dans son *Viandier*, ne diffère pas des recettes modernes. Le bar et la sauce verte restent consommés aujourd'hui.

que nos recettes ont bien peu changé : la **figure 6** montre ainsi que l'on mangeait du bar cuit dans de l'eau salée, ce qui se fait encore aujourd'hui, et que le poisson ainsi cuit était servi avec une « sauce verte », qui se sert encore aujourd'hui.

Certes, il y a eu des modifications : par exemple, la sauce mayonnaise est apparue à la toute fin du ^{xix}^e siècle, à partir de la sauce connue au moins depuis le Moyen Âge sous le nom de « rémoulade ». Cette dernière était une émulsion à base de moutarde et de matière grasse soit froide, soit chaude : le mot « émulsion » fut introduit en 1560 par Ambroise Paré, chirurgien du roi de France, pour désigner des dispersions d'un liquide dans un autre, par exemple de l'huile dans une solution aqueuse (TLFi, 2025) (**Figure 7**).

Progressivement, la rémoulade a évolué jusqu'à ce

qu'apparaisse la mayonnaise, où la moutarde disparaît au profit du jaune d'œuf, pour assurer l'émulsification. La différence de goût était si

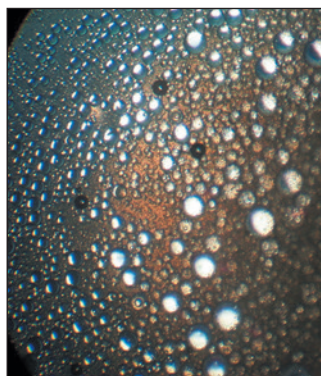


Figure 7

Une émulsion au microscope. Ici, la dispersion de l'huile a été faite à l'aide d'un fouet de cuisine, et la taille des gouttelettes est entre 0,0001 et 0,1 millimètre (les trois formes sombres sont des bulles d'air introduites lors de la préparation de l'échantillon).

considérable que le cuisinier Marie-Antoine Carême (1783-1833) en fit un ingrédient essentiel de sa cuisine (**Figure 8**).

Alors que la technique (la cuisine) évoluait, se développaient aussi les technologies et les sciences des aliments, souvent d'ailleurs avec moins de séparation qu'on ne le fait aujourd'hui. On doit commencer par citer Denis Papin, qui, en 1681, introduisit

un « digesteur » (**Figure 9**), ancêtre de nos cocottes-minute, pour faire le meilleur usage possible des denrées animales, et notamment des os : si les chiens s'en nourrissent, c'est qu'ils renferment des « matières alimentaires » (Papin, 1682 ; d'Arcet, 1829).

D'autre part, les alchimistes avaient bien perçu que les viandes putréfiaient avec une odeur ammoniaquée puissante, alors que les végétaux n'avaient pas ce comportement. À l'époque, on caractérisait cela avec des « sirops de violette », ancêtres de nos indicateurs colorés, en raison des anthocyanes présents dans les fleurs (**Figure 10**).

François Quesnay (1694-1774), en 1736, introduisit le mot « albumine » pour désigner ce « principe » particulier des viandes qui putréfiait en produisant des alcalis, des composés que nous disons aujourd'hui « basiques » (Quesnay, 1736). Toutefois, on aura intérêt à considérer que cette « albumine » n'est pas celle d'aujourd'hui, ou plus exactement n'est pas celles (au pluriel) d'aujourd'hui.

En effet, au XVIII^e siècle, tout d'abord, Jacopo Beccari, à Bologne, avait détecté un « principe animal » (qui fut nommé « gluten » bien plus tard, au XIX^e siècle) dans la farine de blé ; et, en 1759, le chimiste Johannes Kesselmeyer proposa une méthode de « lixiviation » pour l'extraire : il s'agit de malaxer de la farine de blé avec de l'eau, pour faire une boule de pâte que l'on presse ensuite doucement dans un grand récipient d'eau pure ;



Figure 8

Marie-Antoine Carême (1783-1833) fut le cuisinier de plusieurs rois ou empereurs. Il utilisa largement la sauce mayonnaise (qu'il nommait alors « magnonnaise »), alors récemment introduite, pour ses préparations de banquet et sa cuisine « monumentale ».

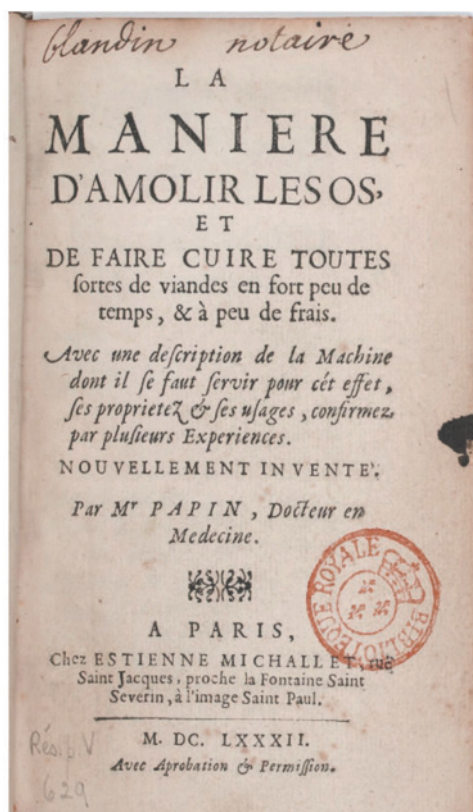
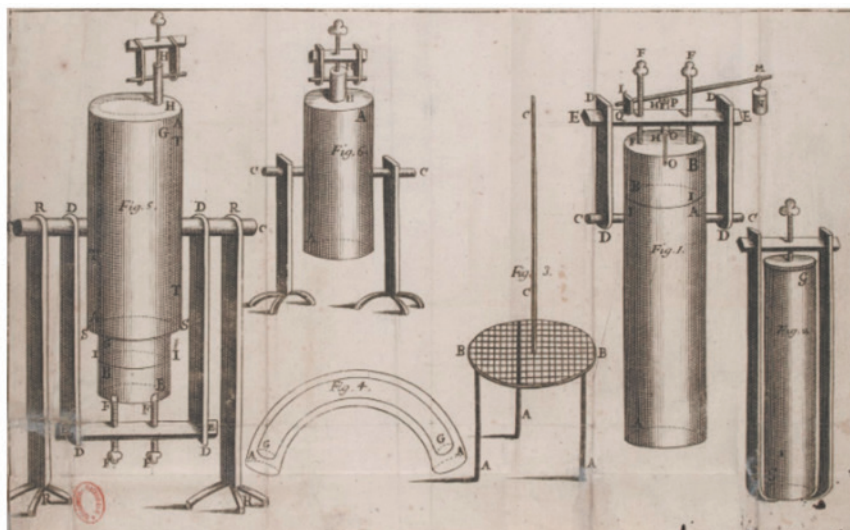


Figure 9

Le digesteur (en haut) introduit par Denis Papin pour confectionner des « bouillons d'os ». L'illustration est extraite de son livre publié en 1682.



Figure 10

En 1664, le chimiste irlandais Robert Boyle proposa des décoctions de violette (en haut) pour détecter les acides et les «alkalis» (bases). En furent dérivés nos modernes papier pH, produits initialement à partir d'anthocyanes, ces pigments de fleurs et de fruits. En bas, la structure moléculaire de la pélagonidine, notamment présente dans les fleurs de violette (*Viola odorata*).

en sort une poudre blanche (l'amidon) tandis que reste entre les doigts une matière

«viscoélastique» (à la fois visqueuse et élastique), qui est le gluten (**Figure 11**). En réalité, cette matière est un mélange de diverses protéines nommées «gliadines» et «gluténines» (essentiellement).

À la même époque, Geoffroy le Cadet (1685-1752) étudia le bouillon, suivi par Lavoisier, qui écrivit en 1783 (Lavoisier, 1783) : «*La Société royale de médecine ayant été consultée, par le ministre de la marine, sur le régime qu'on doit faire observer aux malades dans les hôpitaux, elle s'est aperçue, dans les conférences nombreuses qui ont été tenues à cet effet, qu'on n'avait pas de connaissances assez précises sur la nature du bouillon qu'on donne aux malades, sur la proportion d'eau et de viande qu'on donne aux malades pour le composer, sur la quantité de matière gélatineuse ou extractive qu'il contient, sur les différences qu'apportent dans sa qualité les différentes espèces de viandes ; sur le degré de force que doit avoir le bouillon, suivant les différents états de maladie ou de convalescence ; enfin, sur les caractères au moyen desquels on peut connaître sa qualité. [...] M. Geoffroy a communiqué à l'Académie des sciences, en 1730, un travail sur le même objet ; mais, comme son but était différent du mien, nous ne nous sommes rencontrés ni dans les moyens, ni dans les résultats. L'objet de ce chimiste était de connaître, par l'analyse chimique, la nature des différentes substances nourissantes, soit animales, soit végétales ; en conséquence, dans les expériences qu'il a faites sur les chairs des animaux, il les a successivement fait bouillir dans un*

grand nombre d'eaux différentes, qu'il renouvelait jusqu'à ce que la viande fût entièrement épuisée de toute matière extractive ; alors il faisait évaporer toute l'eau qui avait passé sur la viande, et il obtenait ainsi séparément toute la partie gélatineuse et extractive qu'elle contenait. Mon objet, au contraire, était d'acquérir des connaissances purement pratiques et de déterminer, non ce que la viande contient de substances gélatineuse et extractive, mais ce qu'elle en peut communiquer par une ébullition lente et longtemps continuée, à une quantité donnée d'eau.» Et Lavoisier découvrit que l'on extrait plus à grande eau qu'à petite eau... pour des raisons qui restent à comprendre.

Revenons aux protéines, alors nommées « albumine » au singulier. À l'époque, l'analyse chimique était encore très rudimentaire. Grâce à Lavoisier, elle devient « élémentaire », ce qui signifie que l'on dosait les « éléments » (carbone, oxygène, hydrogène, azote). En tout cas, par ces techniques et à la découverte du gluten, Antoine-François Fourcroy (1755-1809) se mit à évoquer des « albumines végétales ». Puis, progressivement, on découvrit bien des composés du même type, et **le concept de « protéines » fut proposé vers 1910, pour remplacer celui d'albumine ou d'albumines.** Aujourd'hui, on a conservé le mot « albumine », mais pour désigner une catégorie particulière de protéines : globulaires, solubles dans l'eau.

À la même époque, **Antoine Augustin Parmentier (1737-1813) explorait la pomme de**



Figure 11

Quand on malaxe doucement dans de l'eau une boule de pâte faite de farine de blé et d'eau, on voit une poudre blanche en sortir : c'est de l'amidon. L'opération, nommée « lixiviation », laisse entre les doigts une matière plus jaune, le gluten, et qui est faite de nombreuses sortes de protéines.

terre par des travaux scientifiques d'une part, technologiques de l'autre, mais aussi techniques et de propagande (Parmentier, 1783). Il y avait alors un petit âge glaciaire qui réduisait dramatiquement les récoltes, au point que l'on mourait de froid et de faim en pleine nature, le blé manquant plusieurs années de suite (Corvol-Dessert, 2025). Parmentier, pharmacien militaire, revint d'Allemagne où il mangea des pommes de terre : il comprit que, la culture de ces dernières supportant le froid, il y avait là un moyen d'aider les populations. À l'époque, toutefois, l'Académie de médecine avait publié que les pommes de terre, de la famille des Solanacées, parfois toxiques (comme la mandragore *Mandragora officinarum* L. ou la belladone *Atropa belladonna* L.) devaient être évitées : elles auraient donné la lèpre. Mais Parmentier explora

davantage la question, et publia finalement son *Examen chymique des pommes de terre* : il y mêle des données scientifiques et des données techniques. Par exemple, on lit : « *L'eau dans laquelle ont cuit les Pommes de terre étant verte, j'ai fait quelques recherches pour découvrir l'origine de cette couleur, soupçonnant qu'elle n'était pas due aux Pommes de terre en totalité ; je fis donc bouillir à part la peau des Pommes de terre, & la décoction, au lieu d'être verte, prit une couleur semblable à celle d'une forte infusion de thé, laquelle étoit un peu âcre, sans contenir rien d'acide, ainsi que je l'ai jugé à l'aide d'une dissolution martiale. [...] Les Pommes de terre, dépouillées de leur première peau, se décolorent par le contact de l'eau bouillante qui devint verte aussitôt, ce qui me fit présumer d'abord que la couleur rouge en étoit la seule cause : pour m'en assurer davantage, je séparai avec beaucoup de soin la surface rouge des Pommes de terre, & l'eau devint verte en même temps qu'elle prit une saveur un peu âcre.* »

Rétrospectivement, il est intéressant d'observer que Parmentier eut à établir que les pommes de terre étaient « saines », alors que les trois premiers millimètres sous la surface des tubercules contiennent des glycoalcaloïdes (a-solanine, a-solanidine, a-chaconine), et, si l'ANSES (Agence nationale de sécurité des aliments) n'a pas signalé de difficultés à la consommation de pommes de terre non pelées, Aziz *et al.* (2009) montrent que la pratique actuelle qui consiste à consommer les pommes de

terre avec leur peau conduit à consommer des quantités de glycoalcaloïdes parfois supérieures à la limite de consommation (200 mg/kg de masse fraîche, pour la totalité des glycoalcaloïdes). Autrement dit, il faut s'étonner que le public, qui cherche par ailleurs des aliments « sains » et « naturels », ignore que **le cortex des tubercules contient ces alcaloïdes toxiques, et thermorésistants de surcroît, jusqu'à des températures (285 °C) bien supérieures aux températures couramment utilisées pour les fritures profondes.**

Parmentier ne s'est pas limité à la chimie des pommes de terre, et il est allé jusqu'à de la cuisine : « *J'ai fait un gâteau qui a très-bien levé, avec parties égales de pulpe de Pommes de terre & de farine de froment, en y ajoutant du beurre, des œufs, du sel & un peu de levure ; il était même si délicat & si bon, qu'il eût été difficile au plus habile gourmet d'y distinguer la saveur des Pommes de terre : cette saveur est cependant notable dans tous les pains où les Pommes de terre se trouvent, quelle qu'en soit la dose : elle me paroît semblable, si je ne me trompe, à celle du seigle. Je n'ai garde de passer sous silence cette remarque, dans la crainte qu'un jour des gens intéressés, ou de mauvaise foi, ne commettent quelques fraudes.* »

Surtout, Parmentier fut un remarquable propagateur, n'oubliant pas, comme Charles-Maurice de Talleyrand (« *Donnez-moi un bon cuisinier, et je vous ferai de bons traités* ») que la table est un lieu de pouvoir : « *La facilité avec laquelle nos Pommes de terre se prêtent à toutes fortes*

de ragoût m'a fait naître l'idée d'en composer un repas, auquel j'invitai plusieurs Amateurs; & au risque de passer pour être atteint de la manie des Pommes de terre, je vais terminer cet Examen par en faire la description : c'étoit un dîné. On nous servit d'abord deux potages, l'un de purée de nos racines, l'autre d'un bouillon gras, dans lequel le pain de Pommes de terre mitonnoit assez bien sans s'émietter; il vint après une matelote suivie d'un plat à la sauce blanche, puis d'un autre à la maître-d'hôtel, & enfin un cinquième au roux. Le second service consistoit en cinq autres plats non moins bons que les premiers; d'abord un pâté, une friture, une salade, des beignets, & le gâteau économique dont j'ai donné la recette; le reste du repas n'étoit pas fort étendu, mais délicat & bon; un fromage, un pot de confiture, une assiette de bifcuit, une autre de tartes, & enfin une brioche aussi de Pommes de terre, composoient le désert; nous primes après cela le café, aussi décrit plus haut. Il y avait deux sortes de pain; celui mêlé de pulpe de Pommes de terre & farine de froment, représentoit assez bien le pain mollet; le second, fait de pulpe de Pommes de terre, avec leur amidon, portoit le nom de pain de pâte ferme; j'aurais désiré que la fermentation m'eût mis à même de faire une boisson de nos racines, pour contenter pleinement mes convives, & dire avec fondement : aimez-vous les Pommes de terre, on en a mis partout. Chacun fut gai; & si les pommes de terre sont assouplissantes, elles produisirent sur nous un effet tout contraire. »

La stratégie de Parmentier ? Les analyses *a posteriori* sont souvent sujettes à caution,

mais il n'est pas douteux que la mise en œuvre de l'argument d'autorité ait été principale : faire manger des pommes de terre à la famille royale fut essentiel.

Dans l'examen des travaux anciens de chimie des aliments, il faut prendre garde aux termes : de même que le mot « albumine » n'a pas le même sens aujourd'hui et par le passé, les acceptions des termes « chlorophylle », « lécithine » ou « osmazôme » ont changé.

Le mot « **chlorophylle** », tout d'abord, fut introduit en 1818 par les pharmaciens français Joseph Bienaimé Caventou (1795-1877) et Pierre Joseph Pelletier (1788-1842), de l'École de pharmacie de Paris, pour désigner la matière que les cuisiniers extrayaient des végétaux verts, et, notamment, le « vert d'épinard » [encore utilisé aujourd'hui]. On l'obtient en broyant des épinards, puis en chauffant doucement le jus ; se sépare alors, en surface, une mousse d'un beau vert printanier ; dessous, un liquide brun, qui décante. On récupère la partie verte, que l'on utilise ensuite pour colorer diverses préparations (telle la mayonnaise), en vue de donner une fraîche couleur. Il y a quelques siècles, le vert était associé au printemps, et, par là, dans les tableaux et statues de la religion catholique, à la résurrection du Christ. D'où son importance culinaire dans la cuisine française.

Caventou et Pelletier, intéressés par cette matière colorante, reconnurent que leur apport n'était pas considérable :



Figure 12

Séparation, par chromatographie sur plaque, des divers pigments d'un « vert de haricot ». C'est la somme de toutes les couleurs qui fait le vert caractéristique du végétal.

La position verticale de l'image reflète la manière dont la chromatographie est effectuée : verticalement, le bas trempant dans un solvant qui montre par capillarité.

Crédit : Juan Valverde et Hervé This.

« Nous n'avons aucun droit pour nommer une substance connue depuis longtemps, et à l'histoire de laquelle nous n'avons ajouté que quelques faits ; cependant nous proposerons, sans y mettre aucune importance, le nom de chlorophylle. »

Et cette « chlorophylle » fut progressivement analysée : les chimistes George Gabriel Stokes (1864), H. C. Sorby (1873), Mikhaïl Tswett (1906) et Richard Willstätter (1872-1942) découvrirent que la couleur des végétaux verts est due à la fois à des composés verts ou bleus, ou jaunes, ou orange ou rouges. L'un des progrès importants de l'analyse chimique fut la mise au point de la technique de chromatographie sur couche mince : on dépose une fine poudre sur une plaque rigide, avant de placer, à la base de la plaque disposée verticalement, un mélange de composés que l'on veut séparer ; si l'on place la partie inférieure de la plaque dans un solvant, ce dernier monte dans la poudre par capillarité, entraînant les divers composés du dépôt à des vitesses différentes. Se séparent alors des taches qui peuvent avoir des couleurs différentes : chacune correspond à un composé particulier (Figure 12). Parmi les composés séparés du vert d'épinard, certains sont rouges, d'autres orange, d'autres encore jaunes, et d'autres verts ou bleus, correspondant à des chlorophylles, à leurs dérivés (phéophytines, phéophorbides, etc.) ou à des caroténoïdes. Pour les composés donnant des taches vertes, on a ensuite conservé le nom de « chlorophylle »... mais au pluriel, car

on a identifié de nombreuses chlorophylles (Figure 13) : a, a', b, b', c... **Aujourd'hui, parler de la chlorophylle n'a plus aucun sens : il faut parler des chlorophylles, au pluriel.**

Pour la « **lécithine** », c'est Théodore Gobley (1811-1876) qui réussit à l'extraire du jaune d'œuf et qui créa le nom à partir du grec *lekythos*, qui signifie « jaune d'œuf ». La nature chimique de cet extrait resta inconnue jusqu'en 1874, quand les chimistes découvrirent que la lécithine est un mélange de plusieurs composés. Là où la cacophonie s'installe – ce qui fait le lit des fraudes, des malhonnêtetés, des incompréhensions, etc. –, c'est que les publications techniques ou technologiques n'ont pas suivi les progrès de la chimie, et que l'on trouve des définitions diverses et incohérentes : certains définissent le produit commercialisé sous le nom de « lécithine » comme « un mélange de lipides polaires (glycolipides, phospholipides) et de triglycérides, obtenu à partir de tissus animaux ou végétaux » ; d'autres désignent sous ce nom « des lipides contenant du phosphore, extraits des œufs ou du tissu cérébral » ; et une troisième définition désigne la phosphatidylcholine. Selon l'International Lecithin & Phospholipids Society (ILPS, 2020), **la lécithine serait « un mélange complexe de glycérophospholipides d'origine végétale, animale ou microbienne, contenant des quantités variées de triglycérides, d'acides gras, de glycolipides, de stérols, et de sphingophospholipides »**. Toutefois, une définition commune a été

donnée en 2019 par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) : les **lécithines** sont des esters choliques d'acides phosphatidiques» (Figure 14).

2 Un passé encore actuel

Comme Lavoisier et bien d'autres, je crois que la confusion entre science et technologie est néfaste, parce que l'innovation qui se limite à l'examen des techniques est moins puissante que celle qui fait usage des résultats scientifiques. Par exemple, on doit répéter que, sans les travaux d'Albert Einstein sur la relativité, nous n'aurions pas, aujourd'hui, de positionnement par satellite. En matière d'aliment, la confusion est, hélas, répandue : l'analyse d'une table des matières récente d'une grande revue de «chimie des aliments» révèle que la quasi-exclusivité des travaux publiés est constituée de travaux technologiques, et non scientifiques (This vo Kientza, 2024).

Ce déséquilibre a des conséquences étonnantes : par exemple, il est paradoxal

que, encore au début des années 2000, l'industrie alimentaire produisant des bouillons de légumes par milliers de tonnes, on ignorait comment les composés d'une carotte passent en solution lors de la confection d'un bouillon. Aujourd'hui encore, plus de 5 millions d'articles scientifiques sont consacrés au thé, mais pas un ne décrit les mécanismes du passage des composés des feuilles vers l'eau qui fera la boisson. Ou encore, alors que 47 % des sauces classiques françaises comportent du vin, qui est cuit, aucun article n'envisage les modifications de composition de ce vin au cours de la cuisson !

On voit, avec ces exemples, que les sciences de l'aliment sont bien insuffisantes, et c'est la raison pour laquelle, en 1988, le physicien Nicholas Kurti (1908-1998) et moi-même avons introduit la discipline scientifique que nous avons nommée «gastronomie moléculaire et physique» : nous voulions focaliser des études sur les mécanismes des phénomènes qui surviennent lors des transformations culinaires. Insistons :

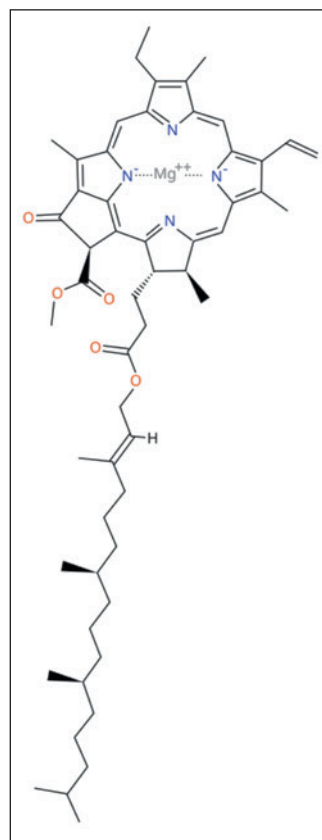


Figure 13

Structure moléculaire des chlorophylles a et b. Chaque sommet ou extrémité d'un segment est occupé par un atome de carbone. Les lettres C, N, O, H et Mg représentent respectivement des atomes de carbone, d'azote, d'oxygène et de magnésium.

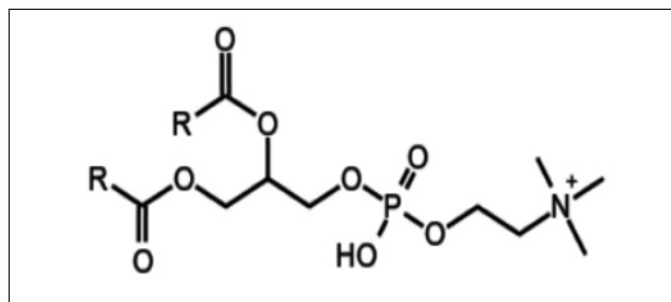


Figure 14

Formules des lécithines. Les lettres R désignent des «restes» hydrocarbonés variés.

même si la gastronomie moléculaire et physique part de l'étude de la « cuisine », il ne s'agit pas de travaux technologiques, mais bien d'explorer les mécanismes, de faire des découvertes, non des inventions. Ce projet véritablement scientifique se poursuit aujourd'hui : plus de 34 équipes de recherche ou d'enseignements, dans divers pays du monde, s'intéressent à la gastronomie moléculaire et physique et ont contribué, pour beaucoup d'entre elles, au *Handbook of molecular gastronomy* (Burke *et al.*, 2021) – 900 pages avec 150 auteurs de 23 pays !

Pour autant, on a vu qu'il reste beaucoup à faire, et c'est d'ailleurs un encouragement pour tous les jeunes qui visent une carrière dans la science ou dans la technologie. Ainsi, nos masters technologiques d'AgroParisTech cherchent à former les élèves ingénieurs à une technologie fondée sur la connaissance scientifique.

Considérons deux résultats de gastronomie moléculaire et physique, l'un très ancien, quasi fondateur, et l'autre bien plus récent et plus puissant.

Pour le travail le plus ancien, un contexte doit être donné : **en 1969**, Kurti écrivait qu'il était paradoxal qu'on connaisse mieux la température à l'intérieur du Soleil qu'à l'intérieur d'un soufflé. Et il est vrai que, à l'époque, **la température dans les soufflés était inconnue. Pour expliquer le gonflement**, on avançait – sans véritable base scientifique – que les soufflés auraient gonflé en raison d'une dilatation des bulles d'air apportées par

les blancs d'œufs battus en neige qui sont utilisés pour confectionner la préparation du soufflé. En 1980, alors que je m'étais intéressé à une « précision culinaire » donnée par des cuisiniers professionnels, à savoir que les soufflés auraient mieux gonflé si les jaunes avaient été ajoutés deux par deux, plutôt que tous ensemble, j'ai commencé par réfuter cette idée. Puis mes expérimentations m'ont montré que des différences apparaissaient entre des soufflés faits à partir de blancs d'œufs battus en neige ferme ou non (This, 2002). Surtout, mes mesures de température et de pression à l'intérieur des soufflés m'ont montré que le mécanisme de gonflement des soufflés n'avait rien à voir avec celui qui était proposé par la théorie, et j'ai fini par établir que si les soufflés gonflent à la cuisson, c'est principalement que l'eau présente dans la préparation s'évapore.

Cette observation scientifique a des conséquences technologiques : notamment, les soufflés gonflent mieux si l'on évapore leur eau par le fond, poussant les couches vers le haut. Il est intéressant de rappeler les résultats d'une expérience toute simple qui a montré qu'un soufflé de 100 g a perdu environ 10 g à la cuisson : avec la production de plus de 15 l de vapeur, il y avait largement de quoi faire gonfler les soufflés. D'ailleurs, lors d'un séminaire de gastronomie moléculaire, nous avons fait gonfler des soufflés sans battre les blancs d'œufs en neige, simplement en nous basant sur le mécanisme plus juste qui avait été découvert.

Il reste beaucoup à faire à propos des soufflés si l'on se souvient que la méthode des sciences de la nature vise à réfuter des théories par nature insuffisantes, mais passons à un autre système : **les sauces émulsionnées**. Avant l'introduction de la gastronomie moléculaire et physique, il y avait, notamment à propos de la sauce mayonnaise, des dizaines d'idées plus ou moins farfelues à propos de cette sauce : par exemple, il était dit, écrit, enseigné que les femmes ayant leurs règles n'auraient pas pu la réussir ; ou que la sauce aurait raté en période de pleine lune, ou quand il y aurait eu des courants d'air, quand du blanc d'œuf serait resté présent avec le jaune d'œuf, etc. Les expériences ont facilement montré que la plupart de ces idées étaient fausses. Mais pourquoi, en cas de réussite, obtenait-on une émulsion ? Les sciences et technologies de l'aliment avaient également des idées fausses. Par exemple, il aurait fallu des pH particuliers, ou pas trop de sel ; il aurait fallu battre avec un fouet en fer dans une bassine en cuivre, afin d'avoir un « effet pile électrique ». Encore dans les années 1990, il était prétendu que les sauces auraient dû leur structure émulsionnée aux phospholipides... mais la production d'une émulsion à partir d'eau et de protéines a bien montré que ces dernières sont des agents bien plus efficaces. Et aujourd'hui, on s'intéresse à la structure du jaune d'œuf, fait de « granules » dispersés dans un plasma, pour comprendre l'émulsification. L'histoire n'est pas terminée.

Terminons cet examen des travaux de la gastronomie moléculaire et physique avec un résultat d'ampleur bien supérieure : l'introduction d'un formalisme pour décrire la structure physique des aliments. La proposition initiale (2001) a évolué progressivement pour former ce qui est nommé aujourd'hui « NDSF », pour *new dispersed system formalism*, « nouveau formalisme des systèmes dispersés » (This vo Kientza, 2021). Il s'agit d'abord de choisir l'échelle à laquelle on veut faire la description d'un système physico-chimique. Pour comprendre ce point, on considérera un aliment à l'œil nu et l'on observera qu'il a une structure macroscopique. Puis, si nous regardons chacune de ses parties au microscope, nous verrons une structure microscopique. Continuons à grossir, et nous détecterons des structurations nanoscopiques, jusqu'à des organisations supramoléculaires.

Une échelle de description ayant été choisie, on s'intéresse aux « phases » constitutives : gaz, « eau » (solutions aqueuses), « huile » (matière grasse à l'état liquide), solide. Dans les aliments, le NDSF décrit les phases et l'organisation topologique de ces dernières : on s'intéresse moins aux formes qu'à l'organisation des phases les unes par rapport aux autres, ce que l'on désigne à l'aide d'opérateurs, au nombre de cinq : / pour une dispersion aléatoire, + pour la coexistence de deux phases dans une troisième, σ pour une superposition ou une juxtaposition, @ pour une inclusion, x pour une imbrication de deux phases continues.

Enfin on décrit la dimension mathématique des éléments

constitutifs : D3 désigne un objet à l'échelle considéré, à trois dimensions, un bloc en quelque sorte ; D2 désigne des objets de type feuille, pour lesquelles une dimension est plus petite que les deux autres d'au moins un ordre de grandeur, et c'est ainsi qu'on a également des lignes D1 ou des points D0.

Avec ces trois types de symboles, pour les phases, les dimensions et les organisations, il y a une quinzaine de symboles qui, jusqu'à ce jour, ont toujours permis de décrire tous les systèmes alimentaires et d'autres systèmes formulés.

Ce formalisme a été utilisé pour l'étude d'un type de système très important pour les aliments à savoir les gels, définis par l'Union internationale de chimie pure et appliquée comme des solides emplis de liquide. Cette définition est très vaste puisqu'elle s'applique aussi bien aux gels de gélatine, pour lesquels il y a deux phases continues (eau et solide), qu'aux tissus végétaux, pour lesquels il y a une dispersion aléatoire de phase aqueuse (l'intérieur du cytoplasme des cellules

végétales) dans l'ensemble du tissu (**Figure 15**). Cela correspond d'ailleurs à des propriétés bien différentes, notamment en termes de diffusion : alors qu'un colorant placé à la surface d'un gel de gélatine peut diffuser dans l'ensemble du système, le même colorant posé à la surface d'un tissu ne diffusera que très localement et par des mécanismes très différents.

Combien existe-t-il de gels ? La mise en œuvre d'un programme informatique fondé sur le NDSF a finalement montré qu'il en existe 16, et 16 seulement, pour les gels les plus simples, avec deux phases. Puis, quand on considère des gels plus complexes, où la phase liquide coexiste avec d'autres phases, à côté de la phase solide structurante, alors on obtient un nombre de gels plus complexes bien supérieur, et notamment égal à 1489 pour la classe 2. Un travail analogue a été effectué pour les suspensions pour lesquelles il existe 6 suspensions de classe 1, et 362 suspensions de classe 2.

Pour tous les systèmes ainsi considérés, il y a des « bioactivités » différentes : les composés présents dans le système ne sont pas libérés de la même façon, à la même vitesse, par les mêmes mécanismes dans le milieu où le système est placé. Et c'est ainsi que s'impose un travail de recherche des relations entre la formule et la bioactivité. Un tel travail est en cours. Évidemment, le NDSF est un formalisme qui permet la description des systèmes,

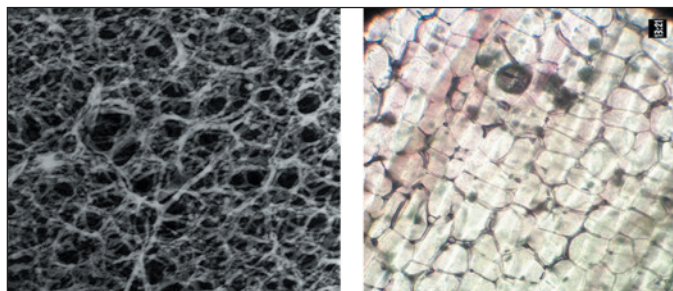


Figure 15

Comme le gel de gélatine (à gauche), le tissu végétal (à droite) est formellement un « gel ».

mais il permet aussi l'innovation : n'importe quelle formule trouvée et écrite peut correspondre à un système formulé qui aura donc des propriétés physiques, chimiques ou biologiques particulières.

D'ailleurs, le NDSF a immédiatement conduit à des propositions technologiques : ayant observé que les dispersions étaient à la base de nombreux systèmes colloïdaux, nous avons imaginé de mettre en série et en parallèle des «micro-mélangeurs». Il a suffi d'une matinée pour assembler trois pompes et trois micro-mélangeurs pour obtenir un système physico-chimique fondé sur une formule NDSF simple. Puis, dans la foulée,

des collègues de Mainz ont produit un micro-mélangeur plus complexe, avec 11 éléments de mélange, qui a été couplé à un ordinateur (sur lequel on entrait des formules) et à des pompes : ce «pianocktail» a été montré en public en 2002 (*Figure 16*).

La cuisine moléculaire : rénover les techniques

Passons maintenant à des applications de la gastronomie moléculaire et physique. La stratégie de Parmentier a été explicitement reproduite dès le début des années 1980, quand il s'est agi de rénover cette activité très périmée qu'était la « cuisine ». Ayant observé la médiocrité de nos systèmes de

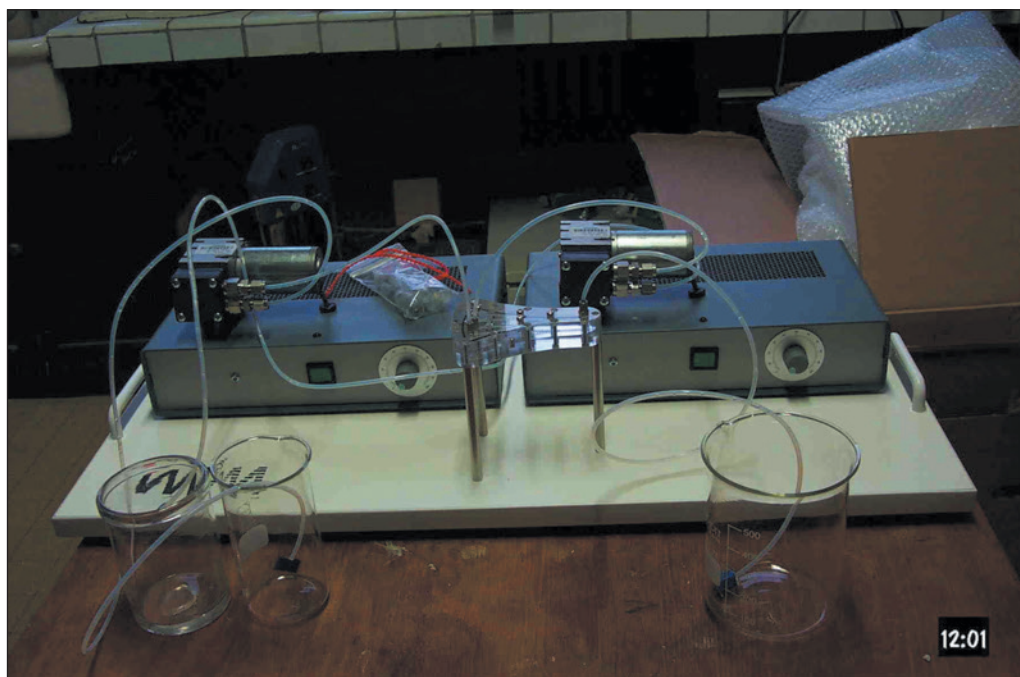


Figure 16

Le « pianocktail » (à gauche), avec son système à plusieurs micro-réacteurs, a été réalisé à Mainz sous la direction de Volker Hessel.



Figure 17

Dans les laboratoires de chimie, les ampoules à décanter permettent de séparer deux liquides non miscibles. En cuisine, ils peuvent être utilisés pour dégraisser les bouillons.

chauffage, puis ayant considéré combien nos pratiques culinaires étaient peu différentes de celles du passé, nous avons conclu qu'il était de la toute première importance de modifier les pratiques culinaires, notamment en faisant évoluer les ustensiles et les méthodes. C'est ce qui a été nommé la « cuisine moléculaire », laquelle s'est aujourd'hui introduite dans l'ensemble des pays du monde (plus de quatre millions de pages Google évoquent la cuisine moléculaire).

Les nouvelles techniques permettant de nouveaux usages, la cuisine a évolué avec la cuisine moléculaire, au point que les cuisiniers professionnels et amateurs, même ceux déclarant ne pas aimer la cuisine moléculaire, ne savent parfois plus qu'ils sont passés à une pratique modernisée, utilisant par exemple des siphons pour obtenir le foisonnement des sauces, des fours modernisés pour cuire à basse température ou confondant l'agar-agar, les alginates et divers carraghénanes avec la gélatine.

Pourtant, nombre de matériels de laboratoire mériteraient d'être mieux utilisés en cuisine. Par exemple, pour la clarification des bouillons, la technique classique impose, une fois le bouillon produit, de le refroidir pour récupérer la graisse, puis de le réchauffer en lui ajoutant un blanc d'œuf battu en neige pour emprisonner les particules qui le troublent, avant de filtrer l'ensemble dans un linge plié en quatre, tapissant un « chinois ». Il serait si simple d'utiliser une ampoule à décanter, pour la séparation

de la matière grasse, et des filtres de laboratoires, pour clarifier (**Figure 17**) ! Très généralement, l'ensemble des procédés classiques de techniques culinaires mérite d'être révisé à l'aune de la technique moderne dont nous disposons dans les laboratoires.

On observera que la stratégie de Parmentier, mise en œuvre dans le cas de la cuisine moléculaire, a eu l'inconvénient de laisser penser que cette pratique était coûteuse : la nouvelle technique a d'abord été proposée aux cuisiniers les plus en vue. Cela a sans doute retardé un peu l'adoption des techniques modernes par le public, qui était en réalité visé. En revanche, les explorations scientifiques de la gastronomie moléculaire qui sous-tendaient le développement de la cuisine moléculaire ont conduit à des innovations par centaines, et, surtout, à un examen critique des techniques jusque-là mises en œuvre.

Un exemple parmi mille : alors que les mousses au chocolat ont toujours été produites en mélangeant du chocolat fondu à du blanc d'œuf battu en neige, le « chocolat Chantilly » (introduit en 1996) [This, 1996] consiste à faire foisonner une émulsion de chocolat dans une solution aqueuse, ce qui conduit à économiser les blancs d'œufs, inutiles techniquement. Il s'agit donc à la fois de bon sens et d'économie familiale.

Mieux, le développement de la gastronomie moléculaire s'est accompagné de l'introduction, dans l'enseignement général ou professionnel, de nouveaux programmes qui sont venus

pallier la disparition des activités culinaires. Cette suppression était justifiée par le fait que l'École ou le Collège doivent former des citoyens éclairés, et non des exécutants de protocoles (ce que sont les utilisateurs des recettes). En d'autres termes, les systèmes nationaux d'enseignement sont plus utiles pour l'enseignement de la technologie que de la technique, ce qui reste une question débattue par l'encadrement du secteur de l'Hôtellerie-Restauration.

Inversement, les jeunes citoyens devant être formés

à une saine consommation alimentaire, il a semblé indispensable de réintroduire l'enseignement de notions culinaires, mais en les incluant dans un cadre culturel plus large. Et c'est ainsi que, le 17 septembre 2000, en Sorbonne, le ministre de l'Éducation nationale d'alors a introduit au niveau national, pour le Premier Degré, les « Ateliers expérimentaux du goût », suivis, en 2004, par les « Ateliers Science & Cuisine », pour les Collèges, en relation avec les programmes scolaires (This, 2000).

Conclusion

Et demain ?

Comment l'alimentation humaine peut-elle encore évoluer ? Nous avons vu que de nombreuses questions demeurent à propos des mécanismes des phénomènes : les sciences des aliments et, notamment, la gastronomie moléculaire et physique ont de quoi faire. Du point de vue technique, on peut observer que, si des progrès ont été faits, entre autres, en termes de cuisson des aliments (les plaques à induction ou les fours à micro-ondes ont des rendements énergétiques bien supérieurs à ceux des systèmes qui consomment du gaz ou d'anciennes plaques électriques), se pose la question de la sécurité alimentaire : les projections semblent maintenant bien acceptées d'une population entre 9 et 10 milliards d'individus, qu'il faudra nourrir. Ne doit-on pas, tout d'abord, s'attaquer aux pertes et aux gaspillages ? Les quantités perdues sont discutées, avec des valeurs considérables dans les pays les moins industrialisés, et des causes diverses

sont évoquées, mais on observera que le transport des tissus végétaux ou animaux puis leur stockage dans les domiciles particuliers s'accompagnent d'une péremption, notamment parce que les micro-organismes ambiants trouvent dans ces tissus des conditions favorables à leur développement (la loi de 1905 interdit la vente de produits non marchands comme le sont beaucoup de denrées endommagées). D'autre part, les systèmes de froid sont critiqués pour leur forte consommation d'énergie. Enfin, on observera que le transport des ingrédients alimentaires est un gaspillage énergétique, dans la mesure où les ingrédients, étant principalement des tissus végétaux ou animaux, sont composés de 40 à 99 % d'eau !

Les coûts de l'énergie augmentant, qui accompagnent l'accès d'une population croissante à l'énergie, doivent sans tarder faire reconsidérer cette dernière question. Et c'est ainsi qu'a été **proposée la «cuisine de synthèse», ou «cuisine note à note», qui, supplantant la «cuisine moléculaire», conduirait à utiliser des composés purs, obtenus par fractionnement ou par craquage des tissus végétaux ou animaux, sur les lieux de production.** Des fractionnements et des craquages sont déjà effectués industriellement dans le cas du lait ou du blé, et les techniques (essentiellement membranaires) mises en œuvre sont déjà au point. La proposition est d'utiliser ces techniques pour toutes les productions de l'agriculture et de l'élevage, et non seulement les deux filières où elles sont utilisées aujourd'hui. À noter que ces opérations de fractionnement s'apparentent en tous points, du point de vue conceptuel, à la lixiviation de l'amidon dans les pâtons de farine malaxée avec de l'eau, telle que la pratiqua initialement Kesselmeyer.

La cuisine de synthèse n'est pas une vue de l'esprit, puisque de nombreux cuisiniers l'explorent

déjà et qu'elle fait l'objet d'enseignements à des élèves ingénieurs agroalimentaires. D'une part, des cuisiniers individuels testent les nouvelles propositions depuis 2009, quand, avec notre aide, le cuisinier français Pierre Gagnaire fut le premier à servir un plat de cuisine de synthèse dans un restaurant, à l'hôtel Mandarin Oriental de Hong Kong, lors d'un repas couvert par la presse internationale. Depuis, les initiatives se sont multipliées. D'autre part, depuis plus de dix ans, des élèves ingénieurs, des cuisiniers et du public participent aux concours internationaux de cuisine de synthèse (International Centre of Molecular and Physical Gastronomy, 2025). De nombreuses autres actions de promotion sont en cours.

La cuisine de synthèse est l'occasion de poser de nombreuses questions artistiques, techniques, technologiques, économiques, sociologiques, scientifiques (au sens des sciences quantitatives). Par exemple, le remplacement des tissus vivants frais par des fractions sèches conduit à repenser la notion d'additifs ou d'aromatisants (fautivement nommés «arômes» par la réglementation actuelle, qui devra changer). Les nouveaux produits, d'ailleurs, doivent faire l'objet de nouvelles catégorisations par les services des douanes, mais aussi par la répression des fraudes. La législation sur la dénomination des aliments, également, sort bouleversée par la cuisine de synthèse.

D'un point de vue nutritionnel et toxicologique, les questions s'imposent également : comment construire une alimentation quotidienne qui serait entièrement de synthèse ? La biodisponibilité des nutriments devient alors une question essentielle, qui doit être explorée en relation avec la construction (technique, artistique) de la microstructure des aliments. De ce fait, on comprend que la question de la construction multi-échelle des aliments devienne un

sujet d'étude passionnant, dans la mesure où il détermine à la fois l'appréciation sensorielle des aliments et la bioactivité des composés bioactifs qu'ils renferment.

Cette cuisine s'imposera-t-elle? Sans avoir aucune certitude, on devra chercher des éléments de réponse en tenant compte de divers éléments : (1) l'augmentation de la population dans le monde s'accompagnera nécessairement d'une réorganisation des circuits alimentaires; (2) l'augmentation des coûts de l'énergie conduira nécessairement à des changements de comportement; (3) la physiologie humaine, forgée au cours de millions d'années d'évolution biologique, ne pourra se modifier notablement dans la courte période des vingt-cinq années qui nous séparent de l'an 2050; (4) l'alimentation est un acte culturel, où les influences sociales, religieuses, symboliques, etc., ne peuvent être omises; (5) le monde vivant évolue, notamment avec des espèces animales qui disparaissent, et qui, de ce fait, ne seront plus consommables demain (on pense aux espèces marines).

Enfin, on serait avisé de ne pas oublier que l'alimentation ne peut changer rapidement, en raison de la «néophobie alimentaire», qui nous est infligée individuellement. La cuisine de synthèse rencontre et rencontrera les réticences qu'a connues la cuisine moléculaire dans les dernières décennies, et l'emploi de la pomme de terre après son introduction en Europe, jusqu'à Parmentier. À nous de guider les évolutions dans des directions favorables, d'utiliser les résultats des sciences pour du bon. La chimie, notamment, devra apporter sa pierre, peut-être moins en mettant des «produits chimiques dans nos assiettes» qu'en apportant des connaissances qui permettront de mieux appréhender les questions de sécurité alimentaire, de sécurité sanitaire, mais aussi d'art culinaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Arcet J.-P.-J. (d'), *Mémoire sur les os provenant de la viande de boucherie*, Paris, Gaultier-Laguionie, 1829.
- Aziz A., Randhawa M.A., Butt M.S., Asghar A., Yasin M., Shibamoto T., "Glycoalkaloids (α -Chaconine and α -Solanine) Contents of Selected Pakistani Potato Cultivars and Their Dietary Intake Assessment", *Journal of Food Science*, 2012, vol. 77, n° 3, T58-T61.
- Burke R., Kelly A., Lavelle C., This vo Kientza H. (eds), *Handbook of Molecular Gastronomy*, Boca Raton, Floride, CRC Press.
- Chung S.Y., Yettella R.R., Kim J.S., Kwon K., Kim M.C., Min D.B., "Effects of grilling and roasting on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in beef and pork", *Food Chemistry*, 2011, vol. 129, n° 4, pp. 1420-1426.
- Commission européenne, Règlement (UE) 2020/1255 de la Commission du 7 septembre 2020, 2020. En ligne : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R1255>.
- Corvol-Dessert A., *Les Famines dans la France des XVIII^e et XVIII^e siècles*, Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France, 2025, vol. 19, n° 3, pp. 1-14.
- Dobzhansky T., "Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution", *The American Biology Teacher*, 1973, vol. 35, n° 3, pp. 125-129.
- Efsa, "Compendium of botanicals that have been reported to contain toxic, addictive, psychotropic or other substances of concern", *EFSA Journal*, 2009, vol. 7, n° 9, p. 281.
- Efsa, "Re-evaluation of Lecithins (E 322) as a food additive", *EFSA Journal*, 2017, vol. 15, n° 4. En ligne : <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2017.4742>.
- Efsa, Re-evaluation of the existing health-based guidance values for copper and exposure assessment from all sources, 2023. En ligne : <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/7728>.
- Gowlett J., Harris J., Walton D. et al. "Early archaeological sites, hominid remains and traces of fire from Chesowanja", Kenya, *Nature*, 1981, n° 294, pp. 125-129.
- Hladik C.M., *Le Régime alimentaire des primates et son adaptation aux ressources du milieu forestier. Alimentation et Nutrition*. Thèse de doctorat. Museum national d'Histoire naturelle – MNHN Paris, 1977.
- ILPS, 2020. En ligne : <http://ilps.org>.
- International Centre of Molecular and Physical Gastronomy. International contests for note by note cooking, 2025. En ligne : <https://icmpg.hub.inrae.fr/international-activities-of-the-international-centre-of-molecular-gastronomy/synthetic-cooking-note-by-note-cooking>.
- IUPAC, *Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units*, Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry, Pure and Applied Chemistry, 2012, vol. 31, pp. 577-612.
- IUPAC, *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. (the "Gold Book"), 2018. Compiled by McNaught AD, Wilkinson A. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version [2019-] created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.
- Kahn D., *Le Fixe et le volatil*, Paris, CNRS Éditions, 2016.
- Labalette F., «Les terribles ravages du "grand hiver" de 1709», *Historia*, 2009, vol. 759, n° 47.
- Lavoisier A. L., «Expériences de novembre 1783. Mémoire sur le degré de force que doit avoir le bouillon, sur sa pesanteur spécifique et sur la quantité de matière gélatineuse solide qu'il contient», in Lavoisier A. L., *Œuvres*, 1783. En ligne : <http://www.lavoisier.cnrs.fr/>.
- Lijinsky W., Shubik P., "Benzo[a]pyrene and other polynuclear hydrocarbons in charcoal-broiled meat", *Science*, 1964, vol. 88, pp. 145-153.
- Miller G.H., Geirsdóttir A., Zhong Y., Larsen D.J., Otto-Bliesner B.L., Holland M.M., Bailey D.A., Refsnider K.A., Lehman S.J., Southon J.R., Anderson C., Björnsson H., Thordarson T., "Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks", *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, L02708.
- Normand J., « Les résidus toxiques générés lors de la cuisson de la viande bovine », 2007, Interbev. En ligne : http://bibliothequerd.interbev.fr/wp-content/uploads/2017/12/residus_cuisson_ie_2008.pdf.
- Papin D., *La Manière d'amolir les os*, Amsterdam, Henry Desbordes, 1682.
- Parmentier A. A., *Examen chimique des pommes de terre*, Paris, Didot, 1783.
- Quesnay F., *Essai phisique sur l'oconomie animale*, Paris, Guillaume Cavelier, 1736.
- Quesnay F., *Le Journal des sçavans*, Paris, Chaubert, 1736. En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k110163x#>.
- Rigault C., «La "Rue des fossés" de Mehun-sur-Yèvre (Cher) : un abondant mobilier céramique du XIV^e siècle rejeté au cœur du quartier canonial (chronotypologie et dynamisme d'un marché)», *Cahiers d'archéologie et d'Histoire du Berry*, 2022, vol. 232, pp. 15-34.

Speth J.D., "When did humans learn to boil?", *Paeolo Anthropology*, 2015, pp. 54-67.

This H., « Le chocolat Chantilly », *Pour la Science*, 1996, vol. 230, p. 20.

This H., "Molecular Gastronomy", *Angewandte Chemie*, 2002, vol. 41, n° 1, pp. 83-88.

This H., *Les Ateliers expérimentaux du goût*, Paris, Presses de la Sorbonne, 2000.

This H., « Une histoire chimique du bouillon de viande », *Mémoi-*

res de l'Académie de Stanislas, Nancy, Année 2007-2008, 8^e série, tome XXII, pp. 175-215.

This H., « Histoires chimiques de bouillons et de pot-au-feu », *L'Actualité chimique*, 2009, vol. 11, n° 336, pp. 14-16.

This vo Kientza H., "Disperse system formalism", *Handbook of Molecular Gastronomy*, CRC Press, 2021, pp. 207-212.

This, vo Kientza H., "Science, technology, engineering and technique", *International Journal*

of Molecular and Physical Gastronomy, 2024, vol. 10(1), n° 4, pp. 1-13. DOI: 10.17180/ijmpg-2024-art04.

Tirel G., *Le Viandier*, 1319. En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62367s.textImage>.

Wandsnider L.A., "The roasted and the boiled: food composition and heat treatment with special emphasis on pit-hearth cooking", *Journal of Anthropological Archaeology*, 1997, vol. 16, n° 1, pp. 1-48.

POUR EN SAVOIR PLUS

Académie d'agriculture de France, séance publique, 2013.
Encyclopedia Britannica, "Lecithin", 2020. En ligne : <https://www.britannica.com/science/lecithin>.

ESCO report prepared by the EFSA Scientific Cooperation Working Group on Botanicals.

European Parliament, Directive, 1995. En ligne : <https://eur-lex.europa.eu/legal->

JECFA, "Lecithin", 1993. En ligne : http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/jecfa_additives/docs/monograph4/additive-250-m4.pdf.

Scholfield C.R., Dutton H.J., Dimler R.J., "Carbohydrate constituents of soybean 'lecithin'", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1952, vol. 29, n° 7, pp. 293-298.

Shurtleff W., Aoyagi A., *History of lecithin and phospholipids (1850 to 2016): Extensively annotated bibliography and source book*, Soyinfo Center, California, Lafayette, 2016.

Szuhaj B.F., *Lecithins: Sources, Manufacture & Uses*, American Chemists Society, BF (ed.), Indiana, Fort Wayne, 1989.

This H., « Les lécithines », Encyclopédie de l'Académie d'agriculture de France. En ligne : <https://www.academie-agriculture.fr/publications/encyclopedia/questions-sur/0801q16-les-lecithines>.

Wareing M., *The Cook's Book: Recipes and Step-by-Step Techniques from Top Chefs*, Copenhagen, DK Publishing, 2005.

Whitehurst R.J., *Emulsifiers in Food Technology*, Blackwell Publishing Ltd, 2004.

Wunderlich L., Szarka A., *A biokémia alapjai*, Typotex Kiadó, Budapest, 2014.

Chimie, biologie, métabolisme : le trio gagnant pour comprendre la nutrition

L'exemple des acides gras

Jean-Michel Lecerf est ancien directeur médical et chef du service de nutrition de l'Institut Pasteur de Lille. Il est aussi membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France, section Alimentation.

Introduction

La nutrition est une discipline scientifique qui fait appel à de nombreuses sciences exactes que sont les mathématiques, la physique, la chimie et, bien sûr, la biologie et la génétique. Mais elle doit aussi intégrer

des données issues de la psychologie, de la sociologie, de l'ethnologie, de l'anthropologie, de l'histoire ou de la cuisine... classiquement considérées comme appartenant aux sciences moins « dures », ce qui fait de la nutrition aussi une science humaine.

La génétique (et l'épigénétique) ainsi que la psychologie confèrent à la nutrition une variabilité interindividuelle considérable, comme pour toute matière humaine. Pour autant, la nutrition n'est pas une science exacte au sens strict dans la mesure où les données utilisées dans les modèles d'études expérimentales ou épidémiologiques sont certes précises mais pas réellement exactes : mesurer les apports nutritionnels d'un individu ou d'un groupe d'individus nécessite une collecte rigoureuse d'informations alimentaires tant sur le plan des ingesta que de la composition des aliments, ce qui n'est guère aisément obtenu.

1 L'objet de la nutrition

La nutrition a pour objet d'étudier et de définir les apports nutritionnels permettant de satisfaire les besoins nutritionnels (et alimentaires, car nous ne mangeons pas des nutriments mais des aliments) du sujet sain ou du sujet malade afin de maintenir ou restaurer sa santé. Mais ces besoins ne sont pas que nutritifs : ils sont aussi hédoniques et relationnels. Ainsi, l'acte alimentaire a une triple fonction : nourrir, réjouir et réunir (Lecerf, 2022). Les mécanismes métaboliques permettent à l'organisme de s'adapter en permanence pour maintenir notre homéostasie interne stable : poids, tissu adipeux, balance énergétique, glycémie, équilibre hydro-ionique (sodium/potassium), équilibre acido-basique, température corporelle, système immunitaire et état

inflammatoire, anabolisme et catabolisme protidique, lipolyse et lipogenèse, ostéof ormation et ostéodestruction, acides gras oméga 6 et oméga 3 – autant de balances directement ou indirectement modulées par notre alimentation. En effet, ces régulations biologiques sont en partie sous l'influence des apports énergétiques, lipidiques, protidiques mais aussi en micronutriments et micro-constituants. Mais la physiologie doit aujourd'hui intégrer un intermédiaire majeur qu'est le microbiote, véritable plaque tournante des interactions entre l'environnement (l'exposome) et le milieu intérieur. Le métabolisme est ni plus ni moins que l'ensemble des processus mis en œuvre par l'organisme pour maintenir stables ces équilibres, y compris en situation de déséquilibre nutritionnel.

L'exemple du métabolisme des acides gras nous paraît emblématique.

2 La biochimie des acides gras

Lorsque nous mangeons des lipides (environ 80 g/j), nous ingérons essentiellement des triglycérides (98 %), puis des phospholipides (2 %) et des esters de cholestérol (250 mg/j en moyenne), comprenant respectivement trois, deux, un acide(s) gras (liaison ester) (Lecerf et Schlienger, 2019).

L'unité de base en matière de lipides est donc celle des acides gras. Ceux-ci sont constitués d'une chaîne hydrocarbonée avec un groupe-méthyle (-CH₃) terminal et un groupement carboxyle (-COOH).

On les classe selon plusieurs critères : leur longueur de chaîne et le nombre de doubles liaisons entre deux atomes de carbone (**Figure 1**).

On distingue donc les acides gras à chaîne courte (C2, C3 et C4, respectivement acide acétique ou acétate, acide propionique ou propionate, et acide butyrique ou butyrate) essentiellement produits par le métabolisme bactérien intestinal, qualifiés d'« acides gras volatils » mais également présents en petite quantité dans la graisse laitière, les acides gras à chaîne moyenne de C6 à C10 et les acides gras à chaîne longue (de C12 à C16) et très longue (à partir de C18).

La présence ou non de doubles liaisons et leur nombre conduisent à distinguer les acides gras saturés (pas de double liaison) et les acides gras insaturés : une double liaison (mono-insaturés), plusieurs doubles liaisons (poly-insaturés). La place de la première double liaison par rapport au groupement méthyle terminal va conditionner leur numérotation : n-3 ou oméga 3 signifie qu'elle se situe après le troisième atome de carbone à partir du CH₃, ou n-6 pour les deux familles d'acides gras poly-insaturés ; et n-7 ou n-9 pour les deux familles d'acides gras mono-insaturés.

D'autres éléments doivent aussi être pris en considération : d'une part, la configuration de la double liaison ; d'autre part, le fait qu'un atome de carbone sépare ou non une double liaison. La configuration habituelle est

SATURÉS	INSATURÉS			
	Monoinsaturés		Polyinsaturés	
	n-7	n-9	Oméga 6	Oméga 3
AGCC ≤ C10 Acide laurique C12 Acide myristique C14 Acide palmitique C16 Acide stéarique C18	Acide palmitoléique	Acide oléique	Acide linoléique ↓ Acide gamma linoléique ↓ Acide arachidonique	Acide α linoléique ↓ EPA ↓ DHA
Impairs C15 : 0 C17 : 0				

Figure 1

Les lipides alimentaires. Classification des acides gras.

dite « cis » : dans ce cas, les hydrogènes sont du même côté, ce qui aboutit à la formation d'une angulation, et donc d'une courbure dans la chaîne ; dans le cas contraire, lorsque les atomes d'hydrogène sont de part et d'autre de la double liaison, et donc en configuration « trans », cela aboutit à une absence de courbure, et donc à une chaîne droite. Quant au fait qu'il n'y aurait pas d'atome de carbone séparant deux doubles liaisons, ce qui n'est pas habituel, cela aboutit à des acides gras dits « conjugués ».

3 Nomenclature des physiologistes

Les acides gras saturés sont dénommés ainsi : C12:0 (acide laurique) soit 12 atomes de carbone et pas de double liaison, C14:0 (acide myristique), C16:0 (acide palmitique), C18:0 (acide stéarique). Mais il existe aussi des acides gras à très longue chaîne : acide arachidique (C20:0), acide béhénique (C22:0) et acide lignocérique (C24:0). Bien que la plupart des acides gras soient pairs,

certains sont impairs (C15:0 ou acide pentadécanoïque) et C17:0 (acide heptadécanoïque) d'origine laitière.

Les acides gras insaturés sont aussi désignés avec le nombre d'atomes de carbone, mais avec en plus la place de la première double liaison (n-3, -6, -7, -9) et le nombre de doubles liaisons figurant juste avant.

Les acides gras mono-insaturés appartiennent à deux familles : n-7 dont le principal est le C16:1n-7 (acide palmitoléique) et n-9 dont le plus important est le C18:1n-9 (acide oléique) ; ils ont donc une seule double liaison.

Les acides gras poly-insaturés sont désignés de la même façon : ils appartiennent à deux familles : n-3 et n-6. Leurs chefs de file sont le C18:2n-6 (acide linoléique) et le C18:3n-3 (acide alpha-linolénique), à ne pas confondre avec le C18:3n-6 (acide gamma-linolénique), qui possède aussi 18 atomes de carbone, trois doubles liaisons, mais la première double liaison après le sixième atome de carbone après le groupement méthyle et non pas après le troisième : il s'agit d'isomères de position d'origine et de rôles totalement différents.

– celles qui sont riches en acide linoléique (n-6) : tournesol, maïs, soja, carthame, noix, argan, pépins de raisin ;

– celles qui contiennent de l'acide alpha-linolénique (n-3) : colza, noix, soja, germe de blé, périlla, cameline, lin ;

– celles qui sont riches en acide oléique (n-9) : olive, colza, arachide ;

– celles qui sont riches en acides gras saturés, surtout acide palmitique : palme, beurre de cacao, palmiste, coprah, karité ;

– enfin, celles qui sont riches en acide gamma-linolénique (C18:3n-6) : onagre, bourrache, pépins de cassis.

Quant au beurre, il contient plus de 400 acides gras, une majorité d'acides gras saturés, notamment de l'acide myristique, mais aussi un acide gras très court caractéristique de la graisse laitière, l'acide butyrique, et des acides gras dits « mineurs » : trans tels que l'acide trans-vaccénique et conjugués tels que l'acide ruménique (linoléique conjugué).

On ne peut pas classer les acides gras selon leur nature animale ou végétale ; cela n'a pas de sens.

4 Les sources d'acides gras

Les aliments contiennent toujours un ensemble d'acides gras (sous forme de triglycérides).

Les corps gras sont soit des huiles (fluides ou concrètes si solides), soit des émulsions comme le beurre ou les margarines. Les huiles ont des caractéristiques que l'on peut résumer ainsi :

5 Aspects physico-chimiques

La biochimie des acides gras conditionne certaines caractéristiques des corps gras telles que leur point de fusion ou leur résistance au chauffage.

Le point de fusion est la température à laquelle un corps gras passe de la consistance

solide à la consistance liquide. Plus il est riche en acides gras saturés, et plus il est solide à température ambiante. Le beurre, qui contient 63 % d'acides gras saturés, a un point de fusion élevé à 32-35 °C, idéal pour une fonte en bouche. L'huile de coprah et l'huile de palmiste (noix du palmier à huile), respectivement 94 et 82 % d'acides gras saturés, restent très solides à température ambiante avec un point de fusion très élevé : elles sont qualifiées de « graisses concrètes ». Plus il y a de doubles liaisons, et plus le point de fusion est bas : ainsi, une huile d'olive riche en acides gras mono-insaturés (acide oléique) est moins fluide qu'une huile de tournesol riche en acides gras poly-insaturés (acide linoléique) ; une huile de poisson très riche en acides gras poly-insaturés avec 5 ou 6 doubles liaisons a un point de fusion très bas (ce qui permet au poisson de rester souple pour se mouvoir dans les eaux très froides).

En ce qui concerne la résistance au chauffage, elle est un peu moins bonne lorsqu'il y a davantage de doubles liaisons. Ainsi, on déconseillera les fritures profondes avec une huile de colza, riche en acide alpha-linolénique (3 doubles liaisons), alors que l'huile de tournesol riche en acide linoléique (2 doubles liaisons) et l'huile d'olive riche en acide oléique (une double liaison) sont plus résistantes. Cependant, en friture plate unique, toutes les huiles conviennent car les espèces chimiques nouvelles formées (produits d'altération thermo-oxydative ou PATO)

sont minimales. La température critique correspond à ce point où des altérations peuvent survenir : elle est, par exemple, de 210 °C pour l'huile d'olive, très résistante.

6 La biologie des acides gras

On distingue les acides gras indispensables, car l'homme est incapable de les fabriquer, et les autres acides gras (Anses, 2011).

Les acides gras indispensables sont au nombre de trois : l'acide linoléique, l'acide alpha-linolénique et l'acide docosahexaénoïque ou DHA (C22:6n-3), encore appelé « acide cervonique ». Ce dernier peut en fait provenir du C18:3n-3 mais la biotransformation endogène de l'acide alpha-linolénique en DHA (avec plusieurs étapes enzymatiques), bien qu'existant, est extrêmement faible (2 à 5 %), de sorte qu'il est maintenant considéré comme indispensable, d'autant qu'il a des fonctions essentielles (on confond parfois les deux termes, ce qui n'est pas juste). Le C18:2n-6 et le C18:3n-3 sont synthétisés par les plantes mais pas par les animaux : nous devons donc ingérer des plantes qui en contiennent ou la chair des animaux qui en ont mangé. Les plantes possèdent un delta 15-désaturase qui leur permet de passer du C18:2n-6 au C18:3n-3, ce que ne peuvent pas faire les animaux, ni donc l'homme (**Figure 2**).

Les deux familles d'acides gras poly-insaturés sont donc indépendantes puisque l'on ne peut

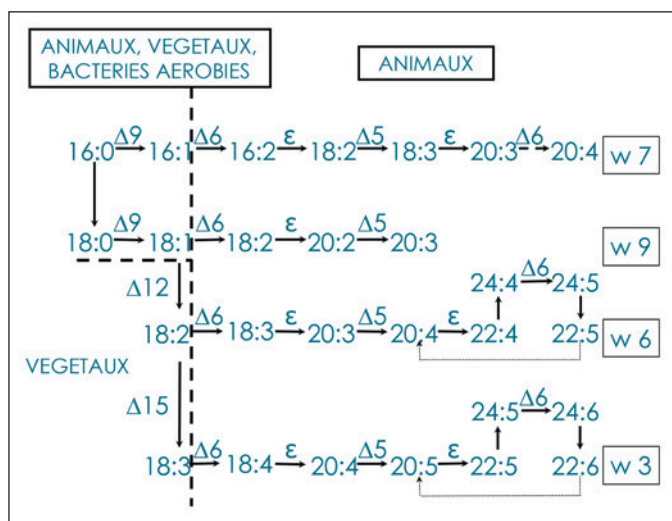


Figure 2

Synthèse des acides gras chez les plantes et les animaux.

pas passer de l'une à l'autre. Mais elles sont liées par le fait que les enzymes désaturases permettant de passer des chefs de file (précurseurs) aux dérivés supérieurs en rajoutant des doubles liaisons (DHA pour la voie oméga 3 ou n-3 et acide arachidonique [C20:4n-6] pour la voie oméga 6 [ou n-6]) sont les mêmes (Figure 3). Il y a

donc compétition de substrat. Or l'affinité des désaturases (delta 6-désaturase) est plus forte pour la série oméga 3 que pour la série oméga 6, ce qui compense le fait que l'apport en acide linoléique est 5 à 15 fois plus élevé que celui d'acide alpha-linolénique.

Certaines espèces animales sont déficitaires en désaturase. C'est le cas des félins qui doivent donc obligatoirement consommer les dérivés supérieurs (acide arachidonique et DHA), présents exclusivement dans la chair animale ; c'est pourquoi ce sont des carnivores obligatoires.

Le C16:1n-7 et le C18:1n-9 peuvent être synthétisés dans les plantes et chez les animaux, respectivement à partir du C16:0 et du C18:0.

Quant aux acides gras saturés, ils peuvent être synthétisés chez l'homme à partir des glucides au niveau du foie. Ils ne sont donc pas indispensables, mais ils sont utiles, sinon l'homme n'en fabriquerait pas s'ils étaient absents de l'alimentation.

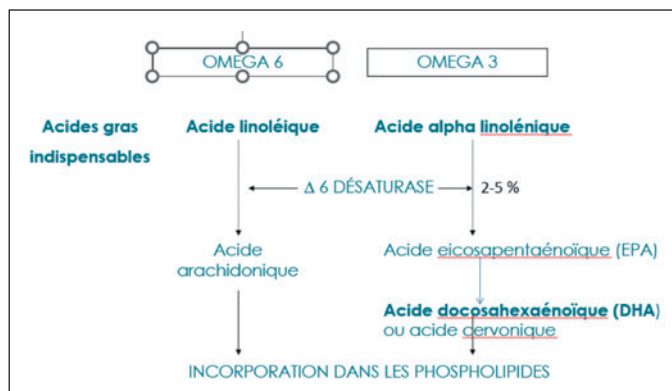


Figure 3

Les acides gras indispensables.

7 L'équilibre des acides gras poly-insaturés

Les dérivés supérieurs de l'acide linoléique et de l'acide alpha-linolénique (respectivement l'acide arachidonique et le DHA) ont des fonctions essentielles (cf. infra) et leur équilibre respectif est lui aussi essentiel car ils ont des fonctions opposées.

En particulier, le DHA est très important pour le développement cérébral et visuel du nouveau-né. C'est pourquoi,

pendant la grossesse, sous l'effet des œstrogènes, il existe une augmentation de l'activité des désaturases afin d'assurer une fourniture suffisante de cet acide gras au fœtus, d'autant plus importante si l'apport exogène (alimentaire) en EPA, ou acide eicosapentaénoïque, parfois surnommé « acide timnodinique » (provenant du thon), et surtout en DHA est insuffisant (poisson gras). En cas de prématurité, l'activité endogène des désaturases est faible chez le nouveau-né, de sorte que le lait qu'on lui apporte doit être impérativement le lait maternel ou un lait 1^{er} âge enrichi en DHA (ceci est devenu obligatoire pour tous). Chez les personnes végétariennes, et surtout végétaliennes, l'absence de produits animaux carnés conduit à un déficit d'apport en acide arachidonique et en oméga 3, ce qui est préjudiciable (Lecerf, 2023a). Seules les microalgues du type *Schizochytrium* peuvent en fournir aux végétaliens.

L'excès d'acides gras trans inhibe la biotransformation de l'acide alpha-linolénique en ses dérivés supérieurs. Au contraire, l'acide myristique (beurre) accroît l'activité de la delta 6-désaturase. Il est donc utile d'apporter des huiles et du beurre, ainsi que du poisson, dans l'alimentation.

La dénutrition, l'âge ou un diabète déséquilibré altèrent cette conversion.

Enfin, le plus important est de maintenir un ratio oméga 6/oméga 3 proche de 4/1 car, s'il est trop élevé, la conversion va s'orienter excessivement vers la série n-6 au détriment de la série n-3, et donc réduire

la synthèse de DHA. C'est une recommandation importante issue des derniers apports conseillés pour la population française (cf. Rapport d'expertise collective de l'ANSES, 2011).

8 Métabolisme des lipides

Lorsque nous ingérons des lipides, ceux-ci (excepté les triglycérides contenant des acides gras à chaîne moyenne) sont hydrolysés dans l'intestin par une lipase d'origine pancréatique conduisant à l'apparition d'acides gras libres (ceux qui sont en position 1 et 3 [externes] sur le glycérol des triglycérides) tandis que l'acide gras en position 2 constitue un 2-monoglycéride absorbé tel quel dans l'entérocyte (**Figure 4**).

Les triglycérides sont absorbés à 98 %. Dans l'entérocyte, les triglycérides sont reconstitués et incorporés dans de

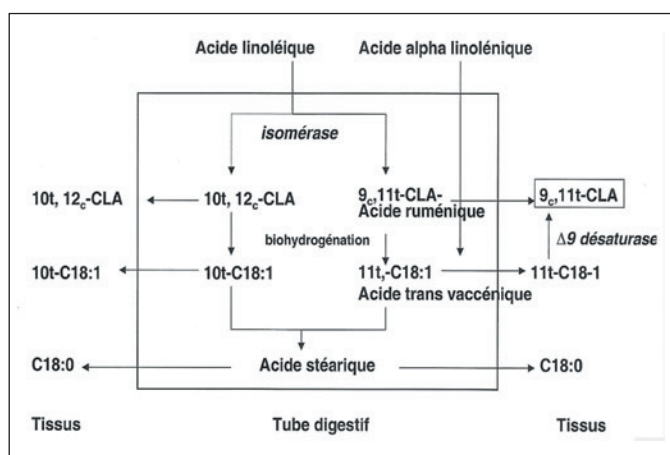


Figure 4

Absorption des lipides (triglycérides).

gros transporteurs de graisses appelés « chylomicrons », qui se forment dans les entérocytes, et contiennent une apolipoprotéine particulière, l'apoB 48. Ceux-ci sont transportés par voie lymphatique jusqu'au foie. Les triglycérides y sont hydrolysés par une lipase hépatique et les acides gras libérés sont alors intégrés dans le pool des acides gras hépatiques. Ils sont resynthétisés sous forme de triglycérides et exportés dans la circulation au sein de lipoprotéines appelées « VLDL » (*very low density lipoprotein*). Dans la circulation, sous l'effet d'une lipoprotéine lipase (LPL) endothéliale, les triglycérides des VLDL sont libérés puis fournis aux tissus ; les acides gras parviennent ainsi aux tissus, y compris le tissu hépatique où les acides gras poly-insaturés subissent l'action des élongases et des désaturases. Ils s'incorporent dans les phospholipides des membranes tissulaires. L'analyse de ceux-ci reflète le statut en acides gras du corps, et pour les acides gras

indispensables, elle reflète leur apport alimentaire. Mais la proportion des acides gras non indispensables, en particulier des acides gras saturés, traduit autant voire davantage leur synthèse endogène (lipogénèse de novo) à partir des glucides (fructose surtout) ou de l'alcool au niveau du foie. Cette synthèse aboutit à l'acide palmitique qui peut ensuite conduire à l'acide cis-palmitoléique marqueur de la lipogénèse de novo (à ne pas confondre avec l'acide trans-palmitoléique, un des acides gras de la graisse laitière). L'interprétation de ce type d'analyse est donc délicate et souvent inappropriée car la proportion d'acides gras saturés est d'autant plus grande que l'apport lipidique est faible et l'apport glucidique élevé !

On peut ainsi les mesurer dans le plasma (dans les esters de cholestérol), dans les phospholipides des membranes érythrocytaires (globules rouges) dans le tissu adipeux. De même, les acides gras poly-insaturés du lait maternel reflètent les apports alimentaires des femmes. À titre d'exemple, la teneur en acide linoléique du lait maternel des femmes américaines augmente de façon linéaire depuis cinquante ans en raison de la place croissante de l'huile de soja, alors que la teneur en acide alpha-linolénique est basse et (trop) faible. Les acides gras laitiers mineurs tels que le C15:0 et le C17:0 reflètent parfaitement la consommation de graisses laitières car ils n'ont pratiquement pas d'autre origine, de même pour l'acide trans-palmitoléique (Figure 5).

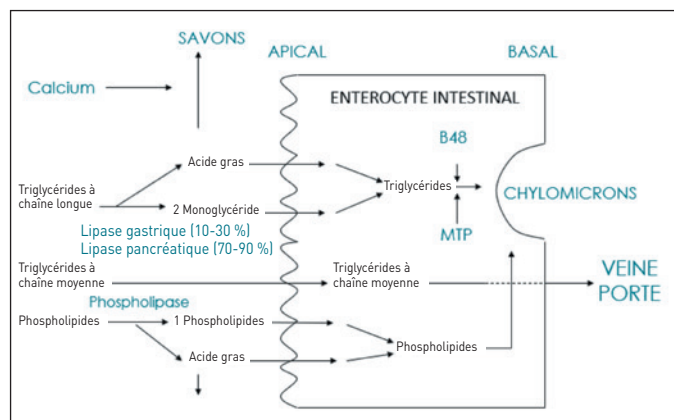


Figure 5

Acides gras laitiers et hydrogénation ruminale.

Les acides gras à chaîne moyenne des triglycérides ne passent pas par la voie des chylomicrons et la lymphe, et parviennent directement par la voie porte (veine hépatique) au niveau du foie. Cela leur confère une grande digestibilité : l'huile de coprah (noix de coco) en est riche. Ces acides gras ont des indications dans des maladies rares du transport des lipides.

9 La biodisponibilité des acides gras

La biodisponibilité des acides gras (Lecerf, 2023b) dépend en partie de leur position sur le glycérol : les acides gras en position 1 et 3 libérés dans la lumière intestinale seront moins absorbés en cas d'apport élevé en calcium, car, dans ce cas, une partie de ces acides gras libres vont former des savons avec le calcium, savons éliminés dans les selles. Cela explique que les acides gras saturés du fromage augmentent moins le cholestérol LDL que le même apport en acides gras saturés provenant du beurre. De même, dans le beurre de cacao ou dans l'huile de palme, les acides gras en position 1 et 3 sont majoritairement des acides gras saturés alors que ceux en position 2, prioritairement absorbés sous forme de 2-monoglycéride, sont principalement des acides gras insaturés, ce qui peut expliquer leurs effets moins hypercholestérolémiants que prévisible. Alors que les huiles de colza et de soja ont à peu près la même teneur en acide alpha-linolénique, la proportion de cet acide gras en position 2 sur le

glycérol est 3 fois plus élevée dans l'huile de colza, de sorte qu'il s'incorpore davantage dans les tissus. Or l'apport en cet acide gras est très insuffisant, deux fois plus bas que ce qui est conseillé.

9.1. Les rôles des acides gras

Ils sont triples : d'abord énergétiques, puisqu'ils fournissent 9 kcal/g (un peu moins pour les acides gras à chaîne moyenne) au lieu de 4 pour les glucides. Mais une calorie lipidique vaut une calorie lipidique. Toutefois, en cas de balance énergétique positive, une suralimentation lipidique réduit l'oxydation lipidique, ce qui conduit à un stockage accru.

Ce sont surtout les acides gras saturés et mono-insaturés qui sont utilisés pour le métabolisme énergétique ; de sorte qu'en cas d'apport trop faible en ces acides gras, les acides gras indispensables peuvent être utilisés à cette fin, ce qui est un gaspillage.

L'autre rôle des lipides est structurel puisque les acides gras poly-insaturés vont s'incorporer dans les tissus, les membranes cellulaires, en particulier dans les tissus nerveux et rétiens (les segments externes des photorécepteurs des cellules à bâtonnets). Cela explique le rôle majeur des acides gras oméga 3 à longue chaîne (DHA surtout) dans la prévention du déclin cognitif lié à l'âge et de la dégénérescence maculaire liée à l'âge.

Enfin, leur rôle est fonctionnel. C'est là encore un rôle majeur des acides gras poly-insaturés. L'acide arachidonique et le

DHA sont à l'origine d'une multitude de molécules qui sont des médiateurs chimiques : les eicosanoïdes (leucotriènes, prostaglandines) impliqués dans l'inflammation, l'allergie, la vaso- et la bronchoconstriction, l'agrégation plaquettaire..., mais aussi d'autres familles chimiques telles que les résolvines, les oxylipines (Lecerf, 2020). Il est surtout important de noter l'importance de l'équilibre entre les deux familles oméga 6 et oméga 3 qui conditionne l'équilibre entre les médiateurs de ces deux familles car ils sont opposés et s'équilibrent. Les acides gras saturés exercent aussi des rôles fonctionnels en se liant à des protéines pour les rendre actives : c'est ce qu'on appelle la « myristoylation » ou la « palmitoylation » des protéines.

9.2. Leurs effets sur la santé

Il n'existe pas de carence en acides gras saturés ou mono-insaturés car l'organisme est capable de les synthétiser. Un excès d'acides gras saturés élève le cholestérol plasmatique, le « mauvais » cholestérol LDL et le « bon » cholestérol HDL. Malgré cela, il n'y a pas de relation de cause à effet entre l'apport en acides gras saturés et le risque de maladie cardio-vasculaire. Par contre, l'excès de graisses saturées d'origine carnée augmente un peu le risque cardio-vasculaire tandis qu'un apport identique en graisses saturées d'origine laitière est associé à une diminution du risque cardio-métabolique (diabète et maladie cardio-vasculaire) (Lecerf, 2016). Cela suggère que les

graisses saturées ne sont pas en cause dans un sens ou dans l'autre et que l'effet observé est lié à ce qu'on appelle l'« effet matrice », c'est-à-dire à l'ensemble des autres constituants des aliments et à leurs interactions.

En revanche, les acides gras trans d'origine industrielle (tel l'acide élaïdique), c'est-à-dire issus de l'hydrogénation partielle des huiles végétales (une partie des doubles liaisons restantes prend la configuration trans), augmentent le risque cardio-métabolique. Heureusement, dans de nombreux pays, leur présence a chuté grâce à l'abandon de l'hydrogénation partielle au profit de l'interstérification mais surtout du fractionnement des huiles : paradoxalement, l'huile de palme a été un recours efficace pour l'obtention de fractions adaptées aux besoins de l'industrie alimentaire (margarines et pâtisserie, biscuiterie...). Les acides gras oméga 3 ont des effets très bénéfiques, surtout l'EPA et le DHA, pour la santé cardio-vasculaire, notamment grâce à leurs effets anti-inflammatoires au niveau de la plaque d'athérome et des antiagrégants plaquettaires. Ils contribuent aussi à la santé cognitive et rétinienne du fait de leur rôle à la fois structural et fonctionnel. Ils sont très importants pour le développement cérébral du fœtus et sa fonction visuelle.

Les carences en acides gras essentiels que sont l'acide linoléique et l'acide alpha-linolénique ont été décrites il y a fort longtemps, respectivement 45 et 90 ans, dans des conditions très particulières

d'alimentation artificielle (Lecerf, 2020); mais elles sont très rares car il faut des niveaux d'apport extrêmement bas pour que des conséquences clinico-biologiques apparaissent. Par contre, les déficits ou déficits d'apport existent, notamment pour les acides gras poly-insaturés oméga 3 à longue chaîne (EPA et DHA), par exemple chez les végétaliens. L'excès d'oméga 6 est aussi préjudiciable car, en augmentant le rapport oméga 6/oméga 3, il altère la biotransformation de l'acide alpha-linolénique en EPA et DHA.

10 Des filières alimentaires pour les acides gras oméga 3

On peut manger directement les acides gras indispensables (acide linoléique et acide alpha-linolénique) présents dans les graines et huiles (et margarines) qui en sont issues, ou présents (DHA) dans le poisson (gras surtout). Mais on trouve aussi l'acide alpha-linolénique dans d'autres végétaux tels que le chanvre, la luzerne, le lin, ou – encore plus comestibles – le pourpier, la mâche, l'épinard, le germe de blé, les graines de moutarde. Les escargots qui se nourrissent de pourpier s'enrichissent de cet acide gras, de même que les poules qui mangent ces escargots; les monogastriques (porc, volaille, lapin) recevant de la luzerne ou des graines de lin ont une chair qui s'enrichit en acide alpha-linolénique (le lapin fournit la chair la plus riche en acide alpha-linolénique, proche de celle du gibier sauvage); de même

pour les œufs des poules avec, en outre, une petite augmentation en EPA-DHA. En ce qui concerne les ruminants, cette augmentation est modeste du fait de l'hydrogénation ruminale (**Figure 6**).

Il est également possible d'enrichir l'alimentation des poules avec des microalgues riches en DHA comme *Schizochytrium* (un des constituants du phytoplancton), donnant lieu à une forte augmentation de leur teneur en ces acides gras sans modification de leur goût (ce qui n'est pas le cas avec la farine ou l'huile de poisson), ce qui peut avoir un intérêt dans la prévention de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (Berthier *et al.*, 2021). Rappelons que la richesse en oméga 3 à longue chaîne des poissons provient pour les herbivores de l'ingestion de phytoplancton et pour les carnivores de l'ingestion de poissons herbivores !

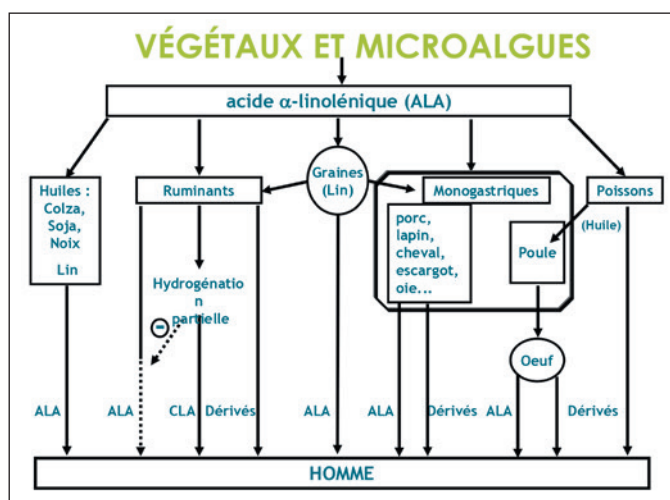


Figure 6

Les filières des acides gras oméga 3.

Conclusion

La complexité est le maître-mot de la nutrition sur le plan scientifique. L'équilibre alimentaire justifie de varier les sources d'aliments sans rien omettre. Les huiles végétales, le beurre, les produits laitiers et le poisson font partie de cette diversité. La biochimie des acides gras est importante pour comprendre leur métabolisme. Les acides gras indispensables sont directement impliqués dans des fonctions essentielles : leur apport et leur proportion sont à l'origine de l'homéostasie de certaines de nos fonctions vitales. Ainsi, chimie, biologie et métabolisme sont nécessaires pour comprendre ce qu'est la nutrition.

Bibliographie

ANSES (2011), Rapport d'expertise collective « Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras ».

Berthier C., Acar N., Simon E., Thabuis C., Bourdillon A., Matthiaud A., Dauchet L., Delcourt C., Benlian P., Crochet M., Defourt S., Tailleux A., Staels B., Bretillon L., Lecerf J.-M. (2021), « Effects of the daily consumption of eggs enriched in lutein and docosahexaenoic acid on plasma composition and

macular pigment optical density », *Nutrients*, 13(10):3347.

Lecerf Jean-Michel (2016), « Acides gras saturés et risque cardio-métabolique », *Médecine des maladies Métaboliques*, vol. 10, n° 5, pages 421-429.

Lecerf Jean-Michel (2020), « Acides gras essentiels », *Encyclopédie médico-chirurgicale. Endocrinologie-Nutrition* : 1-13 [Article 10-542-F-10].

Lecerf Jean-Michel (2022), *La Joie de manger*, Les Éditions du Cerf, Paris, 242 pages.

Lecerf Jean-Michel (2023a), « Impact du mode alimentaire végétalien sur la santé », *Méd. Mal. Métab.*, vol. 17, n° 5, pages 427-436.

Lecerf Jean-Michel (2023b), « Mécanismes en jeu dans la biodisponibilité des lipides », *Pratiques en nutrition*, vol. 19, n° 74, pages 13-15.

Lecerf Jean-Michel et Schlienger Jean-Michel (2019), *Nutrition préventive et thérapeutique*, Elsevier Masson, 2^e éd., Paris, 382 pages.

La souveraineté alimentaire en France

Philippe Pointereau est spécialiste de la recherche sur les transitions en cours sur les pratiques agricoles et alimentaires, facteurs importants des évolutions de la biodiversité et de la santé publique. Membre fondateur de l'association Solagro¹, il est administrateur de l'AFA (Association française d'agronomie), président de la Fondation Terres de Liens et de l'Institut Agro-Campus de Florac. Principalement centré sur des données provenant de la France, son travail a le mérite de les placer dans le contexte international permettant des comparaisons précieuses.

Introduction

certain nombre de questions sur le sujet.

Avant-propos

La « **souveraineté alimentaire** » est un sujet politique. Ainsi, selon l'intervenant, le discours ne sera pas le même en fonction des parties prenantes. Quoi qu'il en soit, c'est un thème dont on va entendre parler car on débat actuellement au Sénat d'une loi d'orientation agricole où il est abordé. De même, des manifestations d'agriculteurs sont organisées et posent un

Introduction avec documents utiles

Comme je n'aurai pas le temps de tout présenter, j'ai sélectionné quelques documents sur lesquels j'ai travaillé ; vous pourrez les trouver sur Internet (**Figures 1 et 2**).

Le premier livre, **Le Revers de notre assiette**, est axé sur des questions d'alimentation et traduit un programme de recherche financé par l'ANR² et piloté par l'INRAE³

1. Solagro est une association française de conseil dans les domaines suivants : agroécologie, méthanisation, stratégies territoriales, gaz renouvelable, énergie et bois.

2. ANR : Agence Nationale de la Recherche.

3. INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement.



Figure 1

Thèmes des ouvrages de Philippe Pointereau publiés à partir des travaux de l'association Solagro.



Figure 2

Présentation du scénario Afterres.

ou transformés font l'objet d'importants flux d'exports et d'imports ; ces flux sont analysés avec une méthode originale, **non pas seulement en euros, mais directement « en hectares »**. On regarde combien d'équivalents hectares on exporte et on importe, pourquoi et quel impact cela génère. Cela permet, entre autres, de mieux prendre en compte les effets sur l'environnement.

Un troisième livre, *Le Pouvoir de notre assiette*, paru aux éditions Utopia, examine directement les aspects liés à l'alimentation ; on le trouve dans les librairies. Il s'intègre au scénario de transition agricole et alimentaire Afterres2050, sur lequel j'ai travaillé depuis l'entreprise Solagro et qu'il décrit et analyse. Afterres essaie d'imaginer les trajectoires que l'on peut avoir d'ici 2050 pour répondre aux objectifs de santé publique, de réduction des émissions de gaz à effet

et l'INSERM⁴. Il s'appelle **BioNutriNet** et se focalisait sur l'impact des régimes alimentaires sur la santé et sur l'environnement.

Dans le deuxième livre, *La Face cachée de nos consommations*, on verra que nos produits alimentaires bruts

4. INSERM : Institut National de la Santé et de la Recherche médicale.

de serre, de maintien de la biodiversité et de la qualité de l'eau. Il s'agit des scénarios rêvés et ambitieux pour pouvoir réaliser tous ces objectifs tout en étant sérieusement chiffrés.

1 Définitions et représentation

1.1. Définition

La FAO⁵ définit la souveraineté alimentaire comme étant le droit des peuples à se nourrir sainement (**Figure 3**) :

Ce n'est pas seulement la sécurité alimentaire dont il est question. C'est aussi une alimentation saine, produite à partir d'une agriculture qui respecte l'environnement : la qualité de l'eau ou la biodiversité. Elle implique aussi que les gens, les citoyens, les consommateurs ont le choix de choisir leur système agricole et alimentaire.

1.2. Différentes visions de la souveraineté alimentaire

La souveraineté pose beaucoup de questions, en particulier en France, parce que l'alimentation, une partie importante du budget des ménages, a des effets sur la santé, l'environnement et l'identité culturelle. La gastronomie française est classée au patrimoine mondial de l'UNESCO tout comme le **régime méditerranéen**. Et, comme on le sait, quand les Français ne mangent pas, ils cuisinent ; quand ils ne

LA SOUVERAINÉTÉ ALIMENTAIRE

« La souveraineté alimentaire est le droit des peuples à une alimentation saine, dans le respect des cultures, produite à l'aide de méthodes durables et respectueuses de l'environnement, ainsi que leur droit à définir leurs propres systèmes alimentaires et agricoles. » (FAO, Rome en 1996)

Un pays dont l'agriculture est commandée par les marchés internationaux a perdu sa souveraineté alimentaire.

Figure 3

Définition de la souveraineté alimentaire par la FAO avec un ajout de Philippe Pointereau.

cuisinent pas, ils parlent d'alimentation.

Personnellement, je suis agronome et je participe à beaucoup de débats actuels sur la façon dont va évoluer notre agriculture. Il y a plusieurs voies possibles.

La **figure 4** présente deux photos qui résument le débat porté par l'UICN⁶ qui est de favoriser des solutions fondées sur la nature plutôt que des solutions fondées sur la technologie. Ici,

6. UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature.

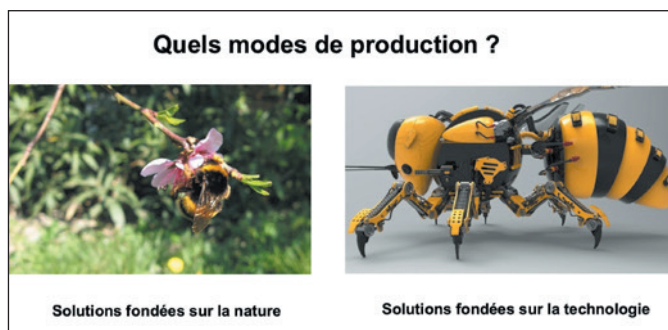


Figure 4

Les grandes classes de méthodes de production agricoles : la nature ou la technologie.

5. FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

il s'agit de la pollinisation, phénomène extrêmement important, notamment pour les fruits et légumes et certains oléo-protéagineux⁷.

Dans ce chapitre, nous allons aussi entrer dans la chimie car **l'un des gros enjeux en agriculture est le contrôle des ravageurs et des plantes adventices – basé aujourd'hui essentiellement sur la chimie.**

7. Oléo-protéagineux : plantes riches en huile et en protéines (ex. : colza, soja).



Figure 5

Illustration de méthodes de production agricoles par la nature ou par la technologie.



Figure 6

Comparaison de 3 modes de consommation alimentaire.

Pour produire, il faut réguler, contrôler les ravageurs, ou les plantes concurrentes – que certains appellent «mauvaises herbes» et d'autres «adventices» – qui vont concurrencer les cultures.

La **figure 5** met l'accent sur l'équilibre à chercher entre l'utilisation d'herbicides qui font table rase sur toutes les «mauvaises herbes» et la cohabitation avec un certain nombre de plantes. Il est intéressant de noter que la tulipe, présente ici dans une parcelle de vigne, était commune dans les années 1950, mais fait aujourd'hui l'objet d'un plan national de sauvegarde. Plus généralement, on avait, il y a une génération, des plantes qu'on appelait «messicoles» qui vivaient avec les cultures ; aujourd'hui, elles sont menacées. La plus connue est probablement le bleuet.

La **figure 6** revient sur le régime alimentaire dans la souveraineté. Elle résume 3 scénarios extrêmes et le lien très fort avec ce qu'on mange aujourd'hui ou que l'on a envie de manger demain.

Le premier est un scénario indien ou népalais, essentiellement à base de protéines végétales (riz), très peu de protéines animales mélangées avec un peu de légumes, et peu calorique. Le deuxième est un plat qui ressemble plus à un régime méditerranéen avec des légumineuses. Puis, en troisième, on a le régime «fast-food⁸», bien implanté en France, puisqu'on est le pays

8. Fast-food : «restauration rapide».

où l'on a le plus de restaurants McDonald's par habitant. Derrière ça, il y a la question de savoir quel système alimentaire on veut, puisque c'est bien le débat de la souveraineté alimentaire qui nous occupe.

Toutes ces façons de s'alimenter donnent des façons de vivre différentes résumées sur la **figure 7** en « 3 visions ».

Le premier système est dit « de Ford » et date de 1974. On voit le support technique qui l'inspirait ; on voit aussi qu'aujourd'hui, avec les téléphones portables, on peut se passer de cette grosse mécanique, mais finalement c'est **une agriculture sans paysans, je dirais même presque sans biodiversité**. On ne voit pas d'arbres, on ne sait pas trop ce qu'il y a derrière – peut-être une usine verticale pour produire des salades ou des porcs. Puis, si vous regardez en haut à gauche, vous avez

une chose rouge. On ne sait pas s'ils avaient déjà imaginé les drones, puisque c'est en débat aujourd'hui. C'est la vision que j'ai appelée « **Fin des paysans et de la nature** ». Là où Ford était malin quand même, c'est que cette image était sur les torchons des ménagères : Ford donnait aux épouses des agriculteurs ce genre de support pour qu'elles influencent leurs maris, notamment sur l'achat de matériel, qui était le domaine réservé des hommes.

La pire image, selon moi, est quand même celle du milieu. Même si le jeune homme est beau, qu'il mange quasiment végétarien ou végétalien, le pire est quand même **le slogan : 0 minute de cuisine**. Ça veut donc dire qu'avec Uber Eats, vous allez manger où vous voulez, quand vous voulez, peut-être tout seul, mais c'est tout. C'est pour moi la fin de la cuisine ; et la fin de la cuisine, c'est la fin de notre souveraineté alimentaire.



Figure 7

Présentation de « systèmes » alimentaires mis en œuvre en pratique.

La troisième photographie représente plus le mode français. On a faim, on mange de façon conviviale, **on discute, on passe du temps à manger**. C'est peut-être le meilleur scénario.

2 Éléments factuels

2.1. Problèmes identifiés par rapport à notre souveraineté en France

Pour aborder un petit peu les éléments factuels par rapport à la souveraineté, regardons la situation en France. Nous ne sommes pas les seuls mais nous sommes, en Europe, l'un des pays qui voient sa population encore augmenter (**Figure 8**).

Actuellement, la population française augmente de 200 000 habitants par an, et ce au moins jusqu'à 2050. Par ailleurs, on est dans un pays dont l'agriculture voudrait « nourrir le monde » et qui est le 6^e pays exportateur de produits agricoles, mais il y a actuellement en France 16 % des habitants,

c'est-à-dire 11 millions de personnes, qui sont dans la précarité alimentaire. Il y a quand même **un surprenant paradoxe dans ce déséquilibre**.

On note aussi une montée des maladies chroniques, comme le montre la **figure 9** ; c'est un vrai problème sanitaire en France. Même si, comme cela vient d'être dit, les Français vivent plus longtemps, on a quand même un développement des maladies chroniques qui ne touche pas que les personnes âgées.

Cette dégradation de la santé n'est pas la simple conséquence du vieillissement de la population. L'analyse des chiffres montre qu'un tiers seulement de cette dégradation peut être attribué aux personnes âgées ; l'augmentation des maladies est également forte chez les plus jeunes.

Pour limiter le développement des maladies chroniques, un Programme National Nutrition Santé (PNSS) a été institué en 2000, avec en particulier l'objectif de contrôler les dépenses du budget général et de l'assurance maladie. Pour les 3 maladies chroniques citées, c'est-à-dire cancers, maladies cardiovasculaires et diabète de type 2, cela coûte à peu près 5 milliards d'euros de plus par an à l'Assurance Maladie en étant classé « affection longue durée » (ALD¹⁰), soit, pour prendre un point de

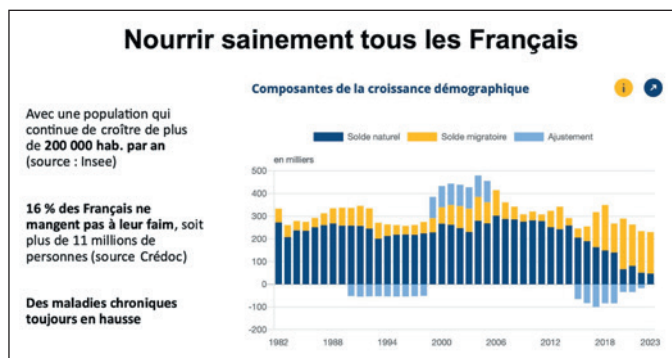


Figure 8

Croissance de la population en France entre 1982 et 2023⁹.

9. Dans la **figure 8**, « Ajustement » correspond à des révisions rétro-polées de manière à arriver à la valeur réelle de la population.

10. Dans la **figure 9**, l'affection longue durée (ALD) concerne une maladie dont la gravité et/ou le caractère chronique nécessite(nt) un traitement prolongé.

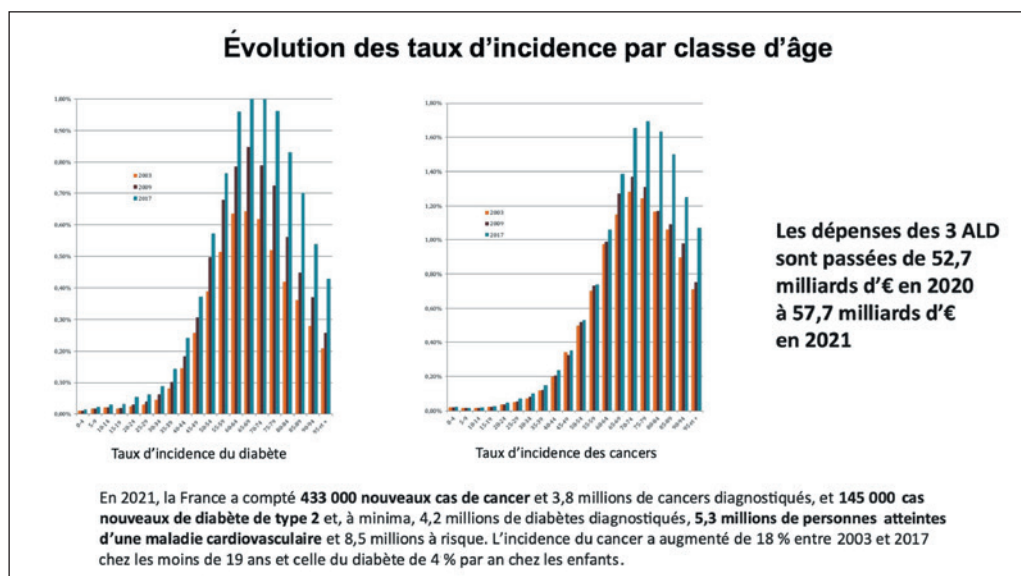


Figure 9

Incidence du diabète et des cancers chez les Français et évolution des dépenses de santé.

comparaison conforme à notre sujet, la moitié du budget de la politique agricole commune.

Limiter l'incidence de ces maladies chroniques est un *challenge*¹¹ considérable. Le constat est qu'aujourd'hui, on ne parvient pas à un fonctionnement satisfaisant des dispositifs qui les limitent ; on n'arrive pas à stopper ces maladies. L'investissement dans la prévention est insuffisant.

2.2. Équation de surface

Pour traiter de la souveraineté alimentaire, j'ai proposé, dans le livre *La Face cachée de nos consommations*, la notion d'**empreinte alimentaire**, égale à la surface nécessaire pour nourrir un Français (*Figure 10*).

Le calcul actuel de la surface consacrée à l'alimentation donne environ 3 700 m² de terres agricoles par habitant en moyenne, c'est-à-dire **un peu plus d'un tiers d'hectare par habitant en France**. C'est ce qu'on appelle l'**empreinte alimentaire**. Dans les surfaces agricoles, certaines cultures ne sont pas à destination alimentaire. Il faut donc les déduire. C'est le cas des fibres, telles que le lin, qui est cultivé en France mais qui ne sert pas à l'alimentation (sauf les graines qui peuvent un peu servir à l'huile, mais ne servent pas à l'alimentaire), le chanvre, mais surtout le coton, qui est totalement importé.

On a aussi des agrocarburants¹², puisqu'une grosse partie de l'huile de colza

11. Challenge : « défi ».

12. Agrocarburants : carburants produits à partir de matières végétales.

Notre empreinte alimentaire

Denrées agricoles	Importations brutes (ha)	Exportations brutes (ha)	SAU française (ha)	Empreinte (ha)
Produits agricoles	10,0 millions	12,7 millions	29 millions	$10 + 29 - 12,7 = 26,3$ millions
Produits alimentaires uniquement	9,1 millions	12,3 millions	27,4 millions	$9,1 + 27,4 - 12,3 = 24,2$ millions

• Empreinte française – Moyenne 2010-2016 pour une population moyenne de 66 millions d'habitants (INSEE) et une surface agricole annuelle moyenne (SAA)

En moyenne, entre 2010 et 2016, l'alimentation des Français correspond à **24,2 millions d'hectares par an**, soit **3 670 m² par personne**. C'est « l'empreinte alimentaire ».

Figure 10

Empreinte en surface des produits agricoles et alimentaires en hectare de surface agricole utilisée (SAU).

actuellement en France sert à la production d'agrocultures. Dans toutes les voitures à moteur thermique (essence ou diesel) utilisées en France, on a 8,5 % d'agrocultures, ce qui représente à peu près l'équivalent de 2 millions d'hectares dont plus de la moitié est importée. Incidemment, 2 millions d'hectares pour 8,5 % de carburant, cela correspond à 70 % de notre surface agricole si l'on souhaitait rouler à 100 % d'agrocultures. Sans insister, on peut se dire qu'il y a un problème d'équilibre !

Continuer à examiner les disponibilités en surfaces agricoles soulève d'autres problèmes. La France a la chance d'avoir beaucoup de terres agricoles, même si on en a quand même perdu depuis 1960 (Figure 11). C'était l'année où on avait le plus de terres agricoles, mais la disponibilité totale ne cesse de

reculer depuis cette date. On a déjà perdu à peu près 6 millions d'hectares. Une partie non négligeable est devenue des forêts, boisées naturellement ou par afforestation ; une autre partie s'est **artificialisée, c'est-à-dire qu'elle a laissé la place à des lotissements, des routes, des parcs**, etc.

La surface agricole disponible par habitant ne cesse de reculer tous les ans. Puisqu'on perd à peu près 60 000 hectares de terres agricoles par an et qu'on gagne 200 000 habitants par an, c'est mathématique : actuellement, on est à peu près à 4 300 m². Je vous ai parlé tout à l'heure de 3 700 m² nécessaires. Sur la marge de 500 m², il y en a déjà une partie utilisée pour les usages non alimentaires. On peut considérer, aujourd'hui, qu'on a finalement tout juste de quoi nourrir un Français.

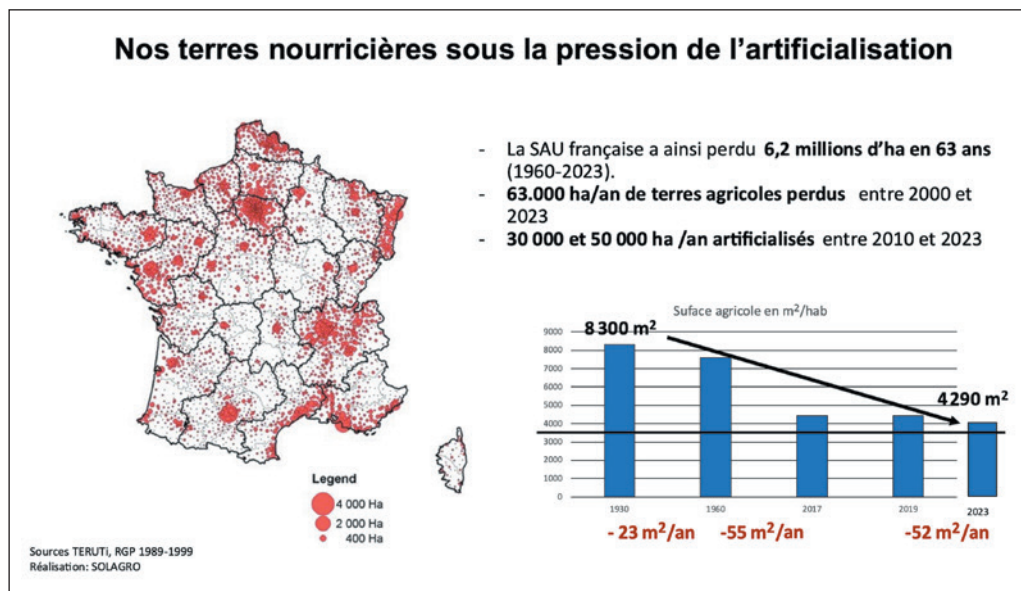


Figure 11

Surfaces agricoles disponibles en France et évolution entre 1930 et 2023.

2.3. Modes de production et produits chimiques

Comme mentionné plus haut, il faut des modes de production qui protègent notre environnement. En France, on n'a pratiquement aucune ressource fossile, à part quelques petits puits de pétrole. De même, on n'a aucune mine en activité en France. Tous les minerais sont importés, donc tous les impacts sont dans les lieux de production en dehors de la France. On a cependant d'autres problèmes en France, qui touchent notamment à la chimie liée à l'utilisation des pesticides¹³, qui impacte fortement la qualité de l'eau et constitue **un véritable enjeu**

de maintien de la qualité de l'eau potable.

Vous avez ici (**Figure 12**) une carte que j'ai réalisée. C'est une carte communale que vous pouvez trouver sur Internet : Le produit le plus traité aujourd'hui en France est la pomme, avec 37 traitements en moyenne par an et parfois jusqu'à 50. Il y a aussi des cultures, notamment les prairies, qui ne sont quasiment pas traitées. On voit que les zones où on a une vraie pression, ce sont les zones viticoles. Vous avez le cognac, où il y a les grosses zones noires, le Bordelais, la zone Languedoc avec beaucoup de vignes et un peu d'arboriculture, et puis tout le grand Bassin parisien où on a de grandes cultures relativement intensives et qui font l'objet de beaucoup de traitements.

13. Pesticides : produits chimiques utilisés pour tuer les parasites agricoles.

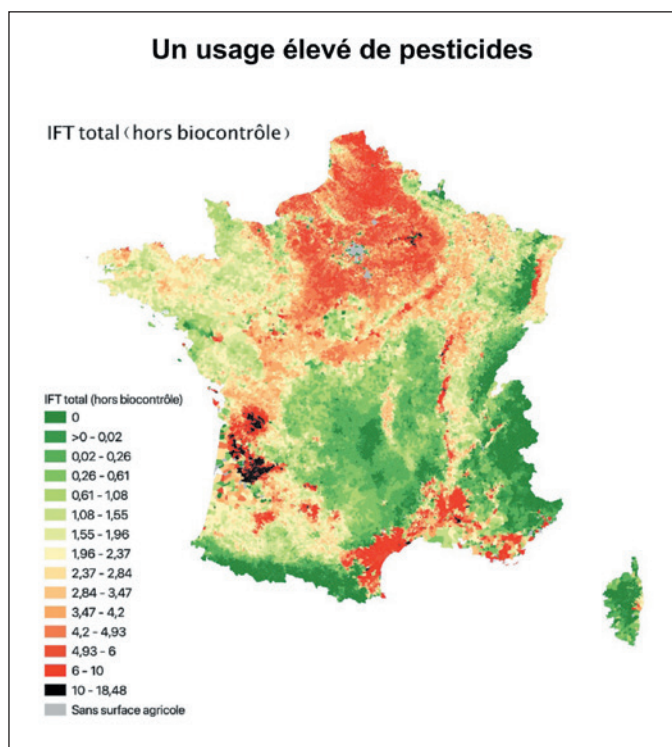


Figure 12

Indice de fréquence de traitement (IFT) des terres agricoles en France (voir l'encart).

L'INDICE DE FRÉQUENCE DE TRAITEMENT (IFT) PAR PESTICIDES

Vous pouvez taper « carte pesticides » puis votre commune, et vous aurez ce qu'on appelle le « nombre de traitements pesticides ».

L'indice de fréquence de traitement (IFT) est utilisé en agronomie¹⁴. Considérons un produit homologué, utilisé à pleine dose sur un hectare. L'utiliser à demi-dose n'est pas recommandé, car normalement, quand on vous dit d'utiliser un médicament, vous n'allez pas dire que vous n'allez en prendre que la moitié. Les pesticides sont en général homologués pour une dose et on est censé utiliser la dose. Si vous traitez une fois un hectare, vous avez un IFT égal à un. À gauche sur la **figure 12** est indiqué le nombre de traitements effectués. Sur les zones rouges, on a fait de 6 à 10 traitements.

Derrière ça, on a un problème de pollution des eaux (**Figure 13**).

On voit qu'aujourd'hui on a une très grande quantité d'eau polluée. Ce sont des données du ministère de l'Écologie. Elles montrent que la concentration de pesticides dépasse la norme de 0,5 microgramme par litre. Cela veut normalement dire que l'eau n'est plus potable ; on est obligé de la traiter, ce qui en augmente les coûts.

On se demande aussi pourquoi il y a une telle dégradation entre 2010 et 2018. La raison est que certains métabolites¹⁵ qui n'étaient pas recherchés en 2010 sont devenus obligatoirement recherchés en 2018. Ils étaient certainement présents en 2010, ce qui implique que la carte de 2010 était « sous-estimée » dans ses impacts.

Plus on cherche, plus on découvre aujourd'hui qu'on a beaucoup de métabolites, ce qui pose une question à la chimie de savoir comment il se fait qu'un certain nombre de molécules qu'on interdit aujourd'hui pour des raisons de santé publique ont réussi à être homologuées vingt ans plus tôt. C'est probablement la conséquence de l'amélioration de la sensibilité des techniques de diagnostic.

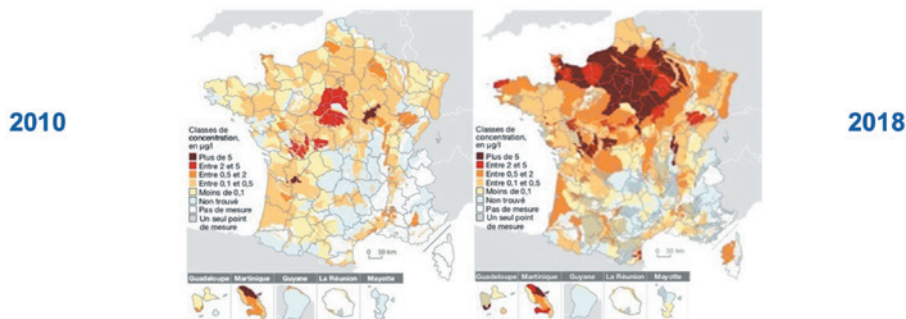
14. Agronomie : science des systèmes de culture et de production agricole.

15. Métabolites : produits issus de la transformation de substances chimiques dans un organisme.

Qui impacte la qualité de notre eau potable

Pollution des eaux souterraines par les pesticides

CONCENTRATION MOYENNE EN PESTICIDES DANS LES EAUX SOUTERRAINES, EN 2010 (CARTE DE GAUCHE) ET EN 2018 (CARTE DE DROITE)



Pour **35 %** de ces points de mesure, la concentration totale en pesticides **dépasse la norme 0,5 µg/l** pour le total des substances (contre 14 % en 2010)

Figure 13

Évolution de la pollution des eaux souterraines par les pesticides en France en 2010 et 2018.

2.4. Évolution de la production future et climat

Il y a moins de terres agricoles et plus d'habitants... que faire ? La solution est : « Il n'y a qu'à produire davantage ! »

C'est bien ce qui s'est fait pendant les trente glorieuses, c'est-à-dire les années après-guerre jusqu'au milieu des années 90 (j'ai situé la rupture en 1996). Mais, **depuis 1996, le rendement est devenu beaucoup plus aléatoire, les aléas climatiques beaucoup plus fréquents**. Par exemple, pour le blé tendre, on gagnait en moyenne 1,3 quintal, soit 130 kilos de blé, chaque année par hectare et, depuis 1996, on en perd 0,8 quintal. Pour les autres cultures, on gagne toujours un peu, mais le rendement est 10 fois inférieur à ce qu'on avait avant.

On atteint là quand même un plafond très lié au changement climatique (Figure 14). Les

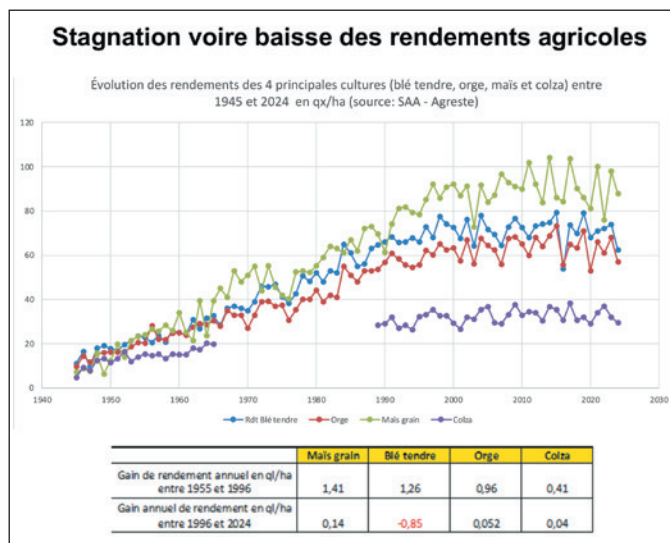


Figure 14

Évolution des rendements agricoles des 4 principales cultures en France entre 1945 et 2024.

années 1976 et 2003 étaient trop chaudes et l'année 2016 trop humide. Le changement climatique, ce n'est pas que la chaleur, c'est aussi l'excès de pluie au mois de juin qui fait chuter les rendements du blé notamment.

Cette situation récente va devoir être intégrée, on ne va pas pouvoir compter sur une augmentation de la production, en tout cas en France. À un moment donné, il va être compliqué de produire tout le nécessaire, d'autant qu'on est dans la stratégie d'aller vers une économie décarbonée¹⁶. Ne pas utiliser d'énergies fossiles, ni pour l'énergie, ni pour toute la chimie basée sur le pétrole, va forcément entraîner aussi une demande en biomasse¹⁷ pour satisfaire un

certain nombre de besoins non alimentaires.

2.5. Impact sur les agriculteurs

La souveraineté alimentaire implique aussi que nos paysans ou nos agriculteurs puissent vivre de leur métier. Il y a quelque chose qui ne va pas, puisqu'ils sont tous dans les campagnes où on a pu voir les effets de leurs manifestations. C'est que la situation est très difficile pour un certain nombre d'agriculteurs. Il y en avait 10 % en 2023 avec un revenu (!) négatif et environ 18 % en dessous du minimum vital.

Ce que montre ce graphique (**Figure 15**), qui est aussi issu des statistiques du ministère de l'Agriculture, c'est une énorme inégalité de revenus dans la profession agricole qu'on trouve difficilement ailleurs. Il y a cette inégalité malgré les variations interannuelles : par exemple, l'année 2022 présentée ici était une des meilleures années agricoles en moyenne par rapport à 2023 ou 2024. Ces deux dernières années, le revenu a baissé parce que le prix du blé mondial a baissé et l'année 2023 a été mauvaise en termes de rendement des céréales.

On voit aussi l'inégalité entre les petites fermes, qui sont majoritaires en nombre et qui présentent un potentiel inférieur à 100 000 euros de chiffre

16. Économie décarbonée : économie qui émet peu ou pas de CO₂.

17. Biomasse : matière organique utilisée comme source d'énergie.

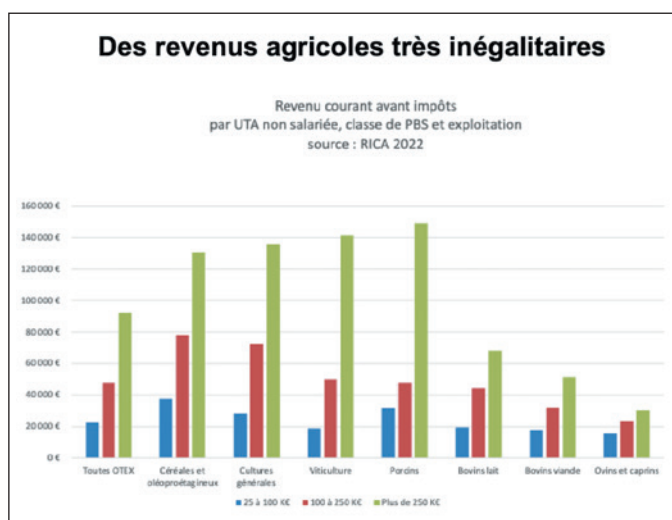


Figure 15

Revenus des exploitations agricoles françaises par UTA¹⁸ selon la culture.

18. UTA : Unité de Travail Annuel. C'est une mesure du travail agricole.

d'affaires, et les grosses, qui ont un potentiel supérieur à 250 000 euros de chiffre d'affaires. Si vous prenez un système assez classique comme « les céréales et les oléo-protéagineux », les grandes cultures qui ne contiennent pas beaucoup de betteraves ou de pommes de terre, vous avez un rapport d'un à trois entre les petites et les grandes fermes. Si vous comparez des éleveurs ovins et des éleveurs céréaliers, vous avez aussi un rapport d'un à quatre. Si vous décidez de faire des ovins, vous êtes sûr de gagner quatre fois moins d'argent que si vous voulez faire de grandes cultures, et ce n'est pas une question de compétence. Un choix de productivité a été fait. Des gains de productivité peuvent être faits dans les élevages hors-sol de porc et de volaille, ou dans les gros élevages intensifs. En grande culture, on peut mécaniser et gérer 2 fois plus de surface qu'une petite exploitation.

C'est l'état actuel de la crise, et ce n'est pas la PAC¹⁹ qui va la résoudre. Je ne sais pas comment la LOA²⁰ va être capable de la résoudre, car c'est très lié à une situation de soutien et de marché international. En plus, concernant les aides apportées par la PAC, plus vous êtes grand, plus les aides par UTA, donc par personne, sont élevées. Ça devrait être l'inverse. Il ne faut donc pas

attendre grand-chose de la PAC demain.

3 La consommation française dans un contexte mondialisé et d'écologie

3.1. Consommation des Français et recommandations

Pour en revenir à l'alimentation, on a traité des protéines dans le chapitre de Verena Poinot sur les protéines végétales. À partir des données de la FAO, on réalise que la France est le pays le plus gros consommateur de protéines au monde, à l'exception de Hong Kong, de l'Islande et de quelques petits pays de quelques millions d'habitants (**Figure 16**). On consomme plus que les États-Unis en protéines totales, mais légèrement moins en protéines animales.

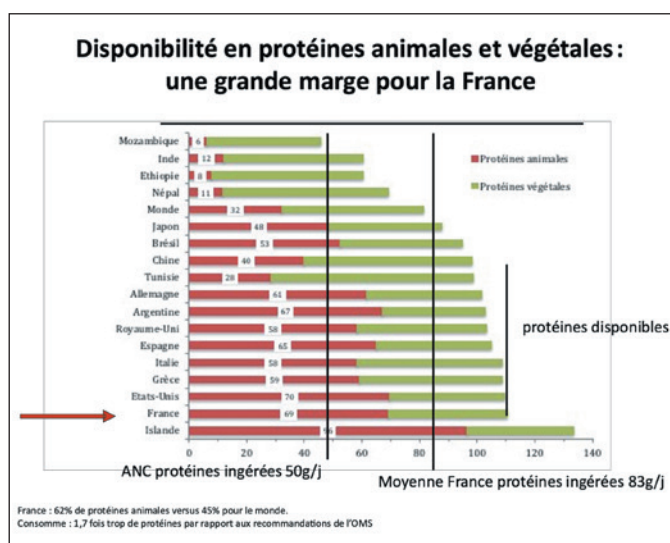


Figure 16

Consommation journalière de protéines animales et végétales par pays.

19. PAC : Politique Agricole Commune de l'Union européenne.

20. LOA : Loi d'Orientation Agricole. Elle définit les grandes lignes de la politique agricole.

D'après les recommandations de l'OMS²¹, on consomme 1,7 fois trop de protéines et surtout trop de protéines animales. Manger moins de protéines animales n'est donc pas un problème de santé publique puisque c'est ce que fait la majorité de la population de la planète. Quand on recommande que, pour avoir assez de surface pour nourrir les citoyens en France, la solution consiste à **manger moins de protéines animales**, cela ne veut pas dire ne plus en manger, mais en manger moins.

Le 4^e Plan National Nutrition et Santé (PNNS4) constitue un programme élaboré avec

l'Anses²³ pour apporter des réponses à nos problèmes. Il est résumé sur la **figure 17** et a été réalisé à partir de travaux d'épidémiologie, avec un avis du Haut Conseil de la santé publique puis **validé et porté par Santé publique France**, le ministère de la Santé.

Ce plan, qui doit être adopté par tous, constitue véritablement la feuille de route de l'agriculture.

On recommande de consommer cinq fruits et légumes par jour, c'est-à-dire qu'il faut produire des fruits et légumes. Vous verrez qu'on en importe la moitié et qu'on n'en consomme pas cinq par jour. On vous recommande de consommer deux produits laitiers au lieu de trois. Cela

21. OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

22. PNNS4 : Plan National Nutrition et Santé 4.

23. Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.



Figure 17

Recommandations du PNNS4²².

Consommateurs de produits bio en France

Conclusions 2020 : 13 études scientifiques 2013-20

E. Kesse-Guyot, J. Baudry, ..., D. Lairon, S. Hercberg.



Les consommateurs réguliers de produits bio montrent :

- **un meilleur profil alimentaire (plus d'aliments végétaux, moins raffinés), des apports supérieurs en nombreux nutriments, avec un meilleur respect des recommandations (PNNS 1 et 4, ANC)**
- **moins d'exposition aux pesticides chimiques** (aliments, urines)
- **une probabilité plus faible** de surpoids et d'obésité (- 50%/-31%), de syndrome métabolique (-31%), de développer un cancer (-25%).
- **un impact réduit** sur les ressources (terres, énergie) et les émissions de GES.

Une plus grande conformité au concept d'alimentation durable/FAO 2010-ONU (nutrition, santé, impacts sur ressources et environnement).

Figure 18

Profil et impact du consommateur bio en France.

veut dire qu'on peut réduire sa consommation de produits laitiers tout en consommant encore beaucoup. Il est aussi recommandé de limiter sa consommation de viande. Il est conseillé de manger moins de 500 g de viande rouge par semaine, ce qui est déjà beaucoup, et moins de 150 g de charcuterie, ce que beaucoup de Français dépassent. Il y a des recommandations sur les légumineuses, ce qui veut dire développer les légumineuses. Surtout, je me suis beaucoup intéressé au dernier point, qui est de consommer des produits végétaux non contaminés par les pesticides, ce qui est un gros enjeu. C'est quand même une chose qui devrait s'appliquer aujourd'hui.

L'agriculture biologique fait l'objet de beaucoup de débats et d'enquêtes. Il semble qu'elle a passé un palier, puisque les surfaces en bio ont reculé

légèrement en 2023-2024 (on pourra discuter du pourquoi). Dans un programme de recherche mené par l'INRAE et l'INSERM sur une cohorte de 30 000 personnes, on a analysé le quintile qui mangeait le moins d'aliments bio et celui qui en mangeait le plus ; les résultats sont résumés sur la **figure 18**.

Un premier point : les consommateurs bio ont une meilleure adéquation avec les recommandations du PNNS. Deuxièmement, ils ont moins d'exposition aux pesticides chimiques, dans les aliments et dans les urines. Troisièmement, ils ont une probabilité plus faible de surpoids, d'obésité et de développer un cancer. Quatrièmement, ce qui était mon travail, ils ont un impact plus réduit sur l'environnement, notamment sur trois indicateurs qu'on avait calculés : l'empreinte surface,

l'empreinte carbone et la consommation d'énergie.

3.2. Équilibre entre import et export

Pour revenir à la souveraineté alimentaire, la logique observée dans beaucoup de pays, c'est un quasi-doublement des exportations agricoles et alimentaires, qui sont des produits bruts ou transformés (**Figure 19**). La même situation s'applique dans beaucoup de pays.

Ce qui est intéressant, c'est que la courbe jaune est parallèle à la courbe bleue, c'est-à-dire que plus on exporte,

plus on importe. Cependant, le différentiel a tendance à s'amenuiser. Le solde import-export ne représente que 6 % des exportations. On a encore un léger différentiel positif en euros et à peu près similaire en surface, mais il tend à se réduire. L'évolution du solde montre surtout que l'agriculture française est partie sur une mondialisation croissante. On parlait justement du Mercosur²⁴. Je pense que c'est l'une des raisons du mal-être actuel des agriculteurs : cette mondialisation conduit à ce qu'ils ne maîtrisent rien.

24. Mercosur : marché commun du Sud (accord commercial entre pays d'Amérique latine).

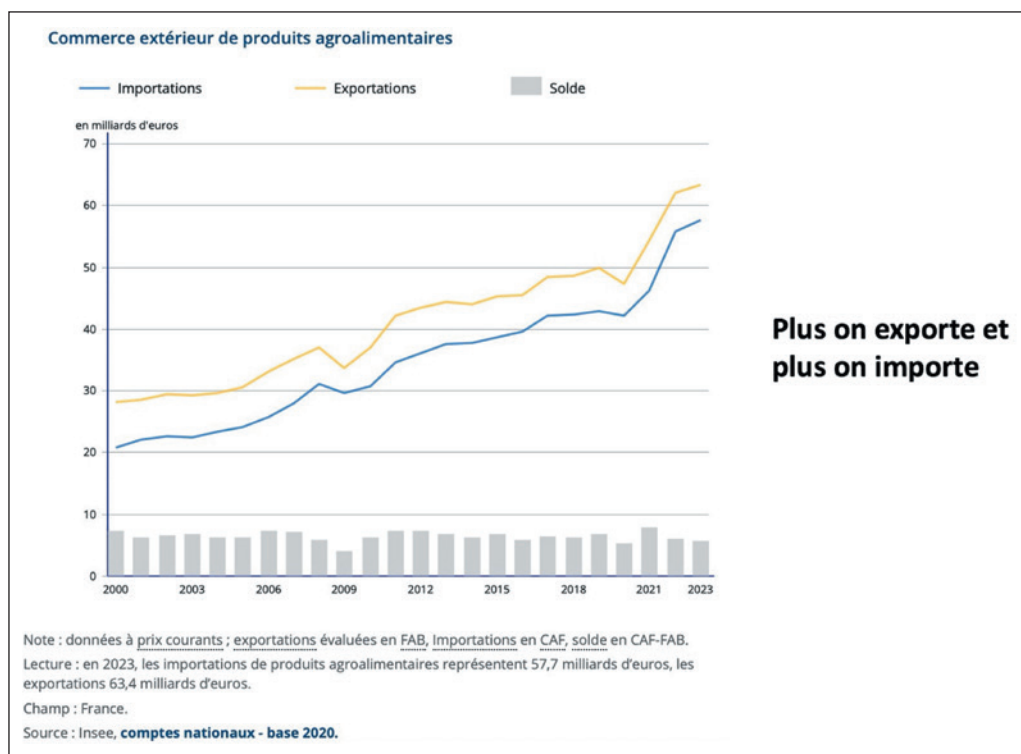


Figure 19

Évolution du solde des importations et exportations agricoles françaises entre 2000 et 2023.

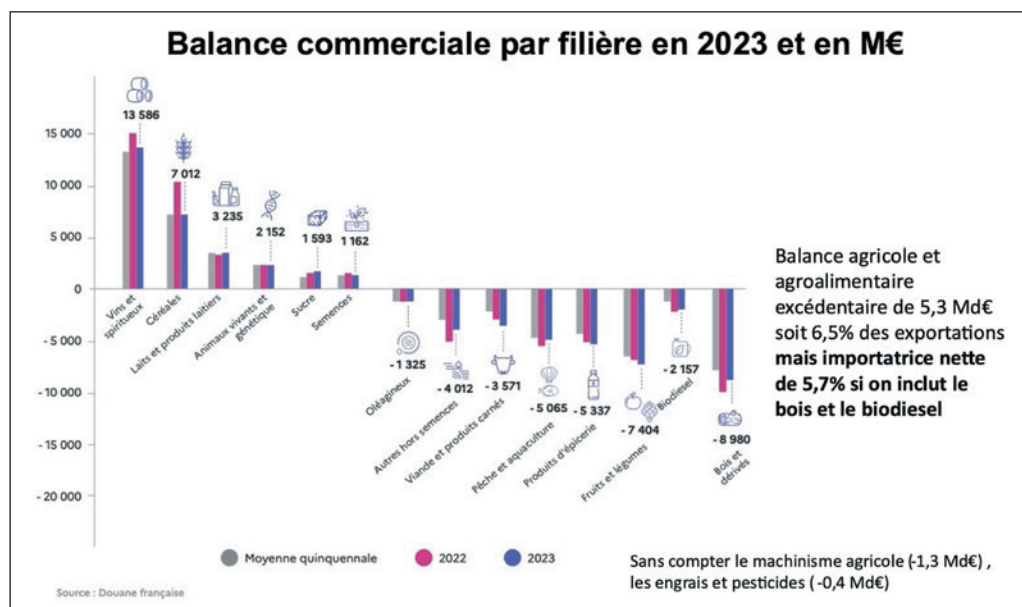


Figure 20

Composition de la balance des importations et des exportations agricoles françaises.

La balance commerciale²⁵ agricole française est présentée sur la **figure 20** :

Ce qui est connu, c'est qu'on est fort sur les vins et spiritueux, donc le cognac, le champagne et les vins de Bordeaux. Si vous les enlevez, car ce n'est pas ça qui va nourrir le monde, on est déjà totalement déficitaire. Après, vous avez les céréales, mais vous voyez par exemple qu'entre 2022 et 2023, ça a chuté énormément car, en 2023, le rendement du blé a chuté de 25 % et le prix du blé a quasiment été divisé par deux. Cela est dû à la guerre en Ukraine qui avait fait flamber les prix. On raisonne ici en euros, ce qui a certains avantages, mais aussi certains

inconvéniens pour expliciter les chiffres. Il faut savoir que la majeure partie des céréales est exportée en Europe pour alimenter les élevages.

Ensuite, il y a les produits laitiers, le sucre. On importe aussi beaucoup d'oléagineux, notamment du colza, ainsi que du soja et de la viande, pour lesquels la France est déficitaire. La pêche a un énorme budget, car les Français, même si les poissons sont très bons pour la santé, en consomment près de 1,5 fois plus que la moyenne mondiale. Si on voulait partager cette ressource, on devrait consommer moins de poisson, même si c'est bon pour la santé. Les fruits et légumes sont aussi un vrai *challenge*. Vous avez ensuite le biodiesel²⁶, qui n'est pas un

25. Balance commerciale : différence entre la valeur des exportations et des importations d'un pays.

26. Biodiesel : diesel produit à partir d'huiles végétales ou animales.

produit alimentaire, mais on en est déficitaire : on importe beaucoup de colza, notamment d'Ukraine.

Finalement, vous avez le bois et dérivés, qui est un produit issu de la biomasse. Si vous faites rentrer le bois dans la balance, la France devient importatrice net. Je ne compte pas ici les produits et les équipements qui servent à l'agriculture, notamment le machinisme ou les engrais, où la France est largement dépendante.

Pour résumer (**Figure 21**) : la France exporte des céréales, et c'est bien, mais il faut bien

voir que ces céréales servent avant tout à nourrir du bétail et non pas des humains.

Si on regarde les terres agricoles utilisées pour l'alimentation en France, ce sont à peu près 27 millions d'hectares. On arrive donc à une quantité de 10 % de terres consacrées à l'exportation.

On exporte beaucoup de viande mais on en importe beaucoup. En surface, on exporte plus qu'on importe. En gris, vous avez le soja, qu'on importe énormément du Brésil et d'Argentine. Le café, le thé, le cacao utilisent aussi beaucoup de surfaces. Les plantes

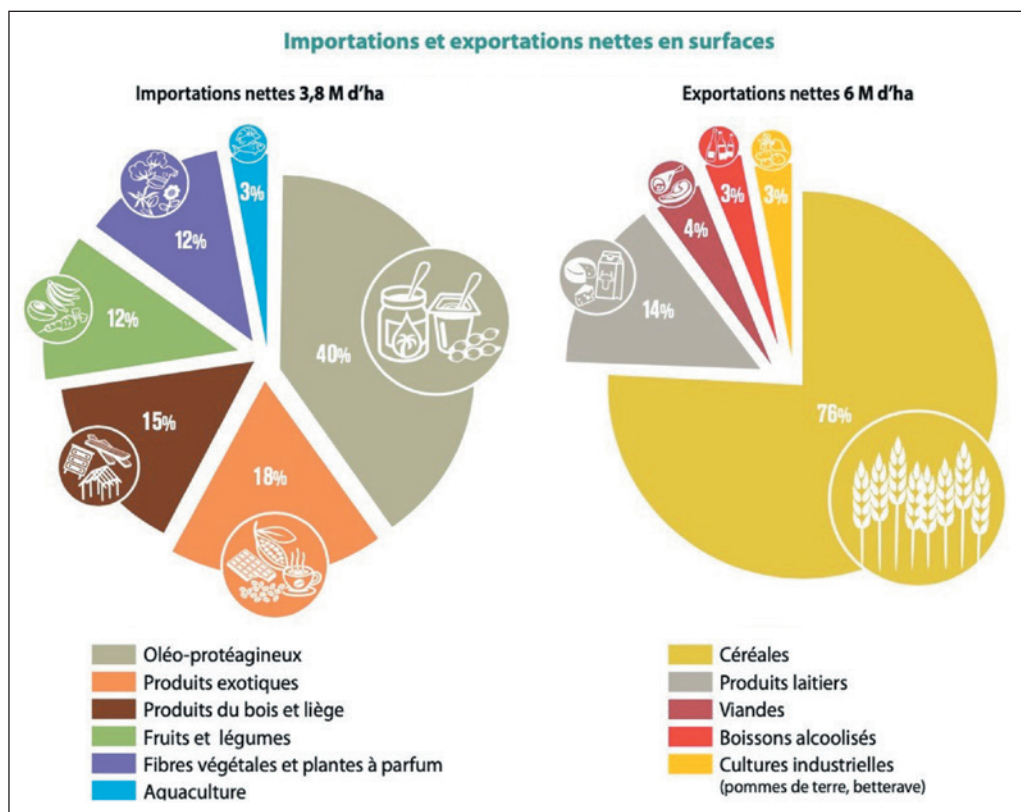


Figure 21

Représentation en surface des importations et exportations agricoles françaises et poids des différents aliments.

industrielles, dont le coton, les fruits et les légumes arrivent ensuite.

Je fais **un petit aparté sur la pêche** (Figure 23) car ça va être une grande année pour la

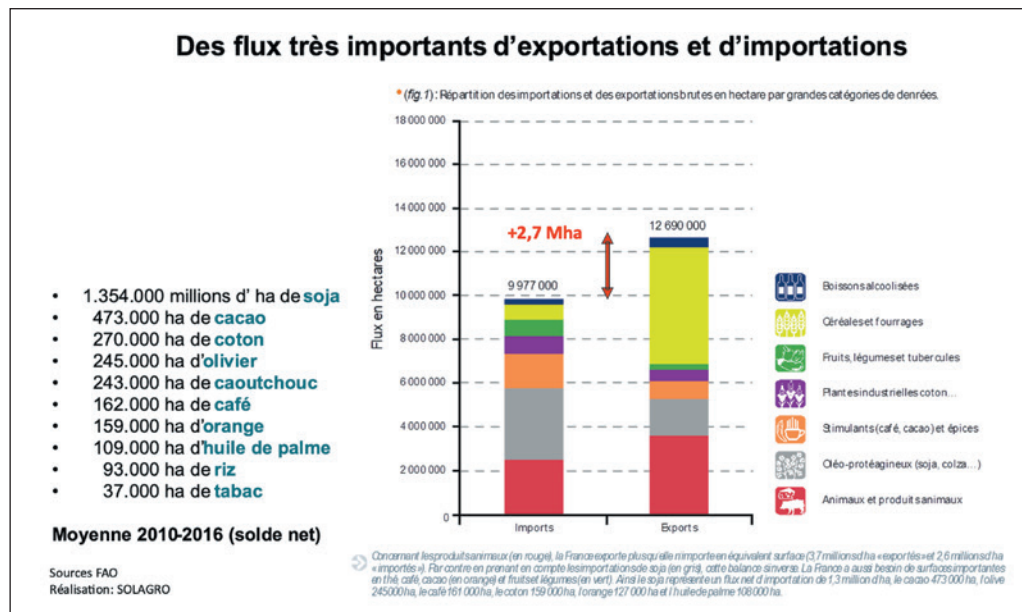


Figure 22

Flux en surface des importations et exportations agricoles françaises.

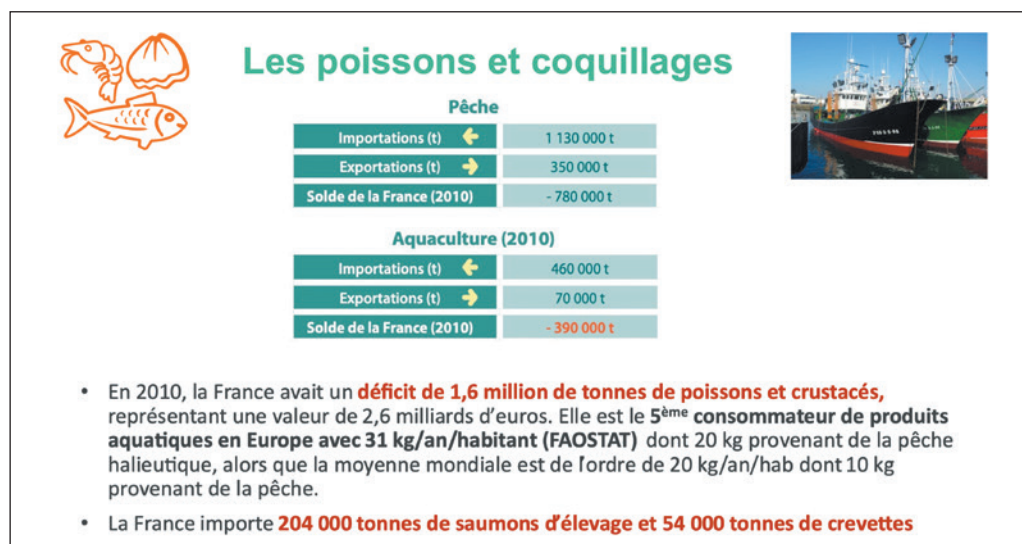


Figure 23

Poids des importations françaises de poissons et coquillages.

pêche, avec un grand sommet à Nice. La pêche est intéressante et importante car, comme vous savez, il y a beaucoup de stocks de poisson qui sont en mauvais état de conservation. Aujourd'hui, la pêche est, pour moi, la sentinelle des capacités de l'homme à gérer ses ressources naturelles, puisque la pêche n'est pas l'aquaculture, mais bien une ressource. C'est ce qu'il y a dans les océans, et cette ressource est limitée. On s'aperçoit qu'avec nos techniques de pêche actuelles, on est capable, même dans un océan immense, de mettre les stocks à bas. On a un problème en France : on mange trop de poisson.

On dit qu'on va nourrir le monde, mais, pour l'instant, c'est nous qui prenons les ressources pour nous nourrir. En effet, les poissons qu'on va pêcher sur les côtes est et ouest de l'Afrique sont des protéines animales qui pourraient largement subvenir aux besoins de ces populations.

Le poisson ne nécessite pas de surface agricole, donc ne rentre pas dans la « balance de surface ». J'ai fait un calcul en disant que les poissons apportent, outre le fer et autres micronutriments²⁷ utiles pour notre santé, surtout des protéines. J'ai donc calculé combien de protéines ça nous apportait en unité d'hectares agricoles de protéines animales : cela représente presque 2 millions d'hectares. En conclusion : si on intègre le poisson, **la France devient importateur net de produits**

agricoles et alimentaires, contrairement à tous les discours qu'on entend. Notre souveraineté est donc déjà mise à mal.

Le domaine des fruits et légumes est résumé sur la **figure 24**. Il est largement influencé non pas par la capacité de produire, mais par le coût du travail. C'est moins coûteux de produire du melon, de la pomme de terre, de la tomate au Maroc ou en Espagne, etc. Les producteurs français sont mis à mal pour tenir la route (**Figure 24**) et on voit tous les produits qu'on importe de partout. Le défi est de construire des politiques publiques pour redévelopper la **production de fruits et légumes, les relocaliser pour répondre à la demande locale**. Des solutions sont à l'étude au niveau du commerce équitable Nord-Nord, et devraient fournir des solutions.

3.3. Intérêt de la consommation bio

L'examen de notre souveraineté alimentaire fait apparaître une tension sur notre disponibilité en terres. La solution est de réduire notre production de protéines animales. Ceci est favorable à la consommation bio, comme le montre l'étude de BioNutriNet (**Figure 25**). En effet, **un consommateur consommant à peu près 70 % de son alimentation en bio consomme quatre fois plus de légumes secs, de fruits à coque, deux fois plus de légumes et de fruits et entre 30 et 50 % moins de produits laitiers et de viande.**

27. Micronutriments : nutriments essentiels en très petites quantités (ex. : vitamines, minéraux).



L'exemple des fruits et légumes



Importations (t)	←	10 500 000 t
Exportations (t)	→	5 100 000 t
Solde de la France (t)		- 5 400 000 t
Importations (ha)	←	680 000 ha
Exportations (ha)	→	210 000 ha
Solde de la France (ha)		- 470 000 ha

- **50%** de nos fruits et légumes sont **importés**
- L'équivalent de **680 000 ha importés** principalement d'**Espagne-Maroc** (tomate, aubergine, laitue, concombre, melon, fraise, orange, cerise, olive), **Brésil** (jus d'orange), **Turquie** (noisette), **USA** (amande, pistache), **Costa Rica** (ananas), **Côte d'Ivoire** (bananes), **Afrique du Sud** (pamplemousse), **Italie** (raisin frais), **Pérou** (avocat), **Allemagne** (graine de moutarde), **Canada** (lentille)
- **Relocaliser** (légumes d'été, fruits à noyau, olive, amande, châtaigne), **substituer** (jus d'orange versus jus de pomme), **sobriété et équitable** (chocolat, café)

Figure 24

Équivalents en surface des importations françaises de fruits et légumes.

Alimentation des consommateurs réguliers de BIO vs NON

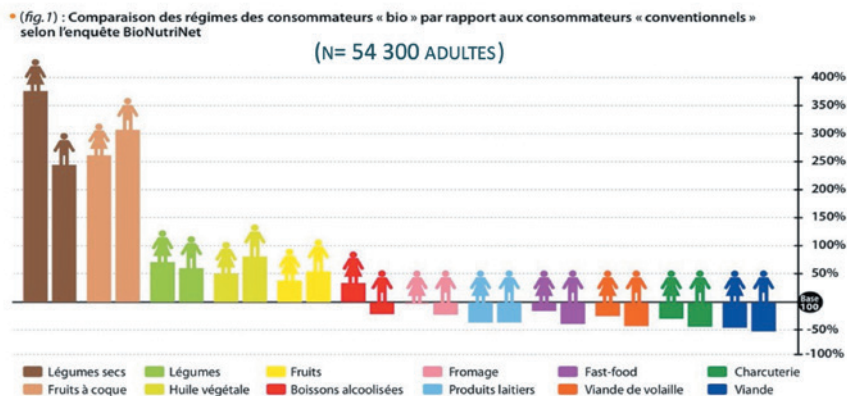


Figure 25

Impact selon une base équivalente à 100 des consommations bio ou non en France selon BioNutriNet.

Le consommateur bio actuel représente relativement bien le consommateur qu'on aimerait avoir demain. Il répond à la fois aux objectifs du PNNS4

et aux objectifs environnementaux, notamment en n'utilisant pas de produits chimiques, c'est-à-dire les engrais chimiques et les pesticides.

Le graphique suivant (*Figure 26*) représente beaucoup de travail et mobilise beaucoup de données. Il donne l'empreinte surface d'un consommateur conventionnel, qui ne consomme quasiment pas de produits bio, et celle d'un consommateur bio :

Ce qui apparaît, c'est l'importance des produits animaux dans l'empreinte surface. Aujourd'hui, **90 % des surfaces consacrées à notre alimentation en France sont dédiées à la production de protéines animales**. Le reste ne représente que 10 %, car l'essentiel des céréales qu'on cultive en France est utilisé dans l'alimentation animale. Par exemple, quand vous produisez de l'huile de colza, le tourteau est utilisé dans l'alimentation animale. De même, vous avez 50 % de prairies en France, donc vous avez déjà

50 % des surfaces dédiées aux ruminants.

La conclusion est que, quand vous consommez moins de protéines animales, vous pouvez réduire votre empreinte de 23 %. C'est quand même une solution par rapport à l'équation de ne plus avoir assez de terres pour nous nourrir, sachant qu'on va peut-être avoir besoin de terre pour d'autres usages non alimentaires (énergie, matériaux, chimie verte, habillement...).

Pour les GES²⁸ (*Figure 27*), le différentiel est plus important car il y a le méthane lié aux vaches et le protoxyde d'azote qui comptent quand même pour 80 % des gaz à

28. GES : gaz à effet de serre. Ils contribuent au réchauffement climatique.

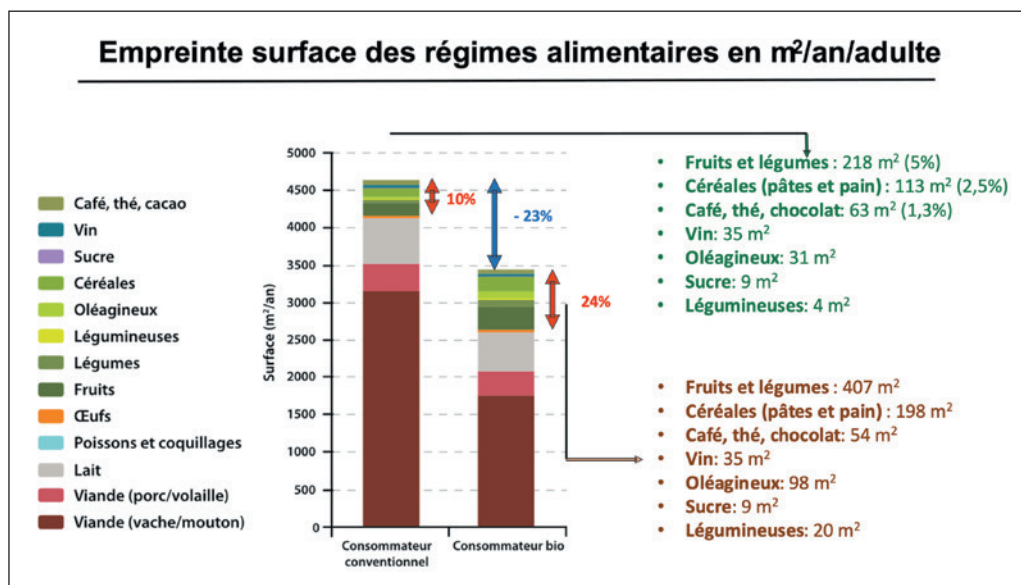


Figure 26

Empreinte en surface des régimes alimentaires des adultes.

Empreinte GES des régimes alimentaires en tonnes eqCO₂/an

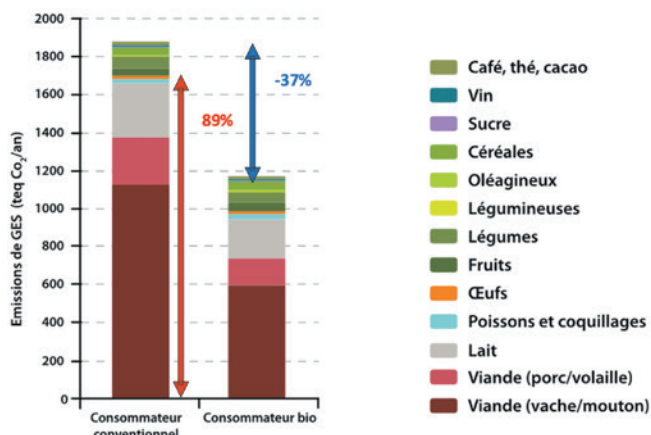


Figure 27

Émissions de gaz à effet de serre (GES) des régimes alimentaires.

effet de serre de l'agriculture. Forcément, l'impact est plus important.

3.4. Impact écologique de notre alimentation

Les gens entendent toujours dire, vers le 7 mai, que la France a atteint le jour du dépassement, lorsqu'on a consommé les ressources dont on disposait et qu'à partir du 7 mai, finalement, on utilise des ressources qu'on n'a pas (Figure 28). C'est vrai pour chaque pays et le monde entier.

Pour le monde entier, c'est un peu plus tard, mais pour la France, comme on est de gros consommateurs, c'est le 7 mai. La méthodologie est un peu compliquée, donc je vous renvoie à *La Face cachée de nos consommations* qui explique cette méthode développée par

des universités américaines. Ils comparent ce qu'on appelle la « biocapacité », la capacité à produire ses ressources, et l'« empreinte », c'est-à-dire la consommation des ressources. L'empreinte prend en compte le traitement des gaz à effet de serre qu'on est censé neutraliser.

Vous avez deux façons de les neutraliser : soit vous les stockez dans la biomasse et vous plantez des forêts, soit vous développez les énergies renouvelables ou des surfaces pour produire l'équivalent. Ce que vous voyez bien dans les deux petits tableaux (Figure 28) que vous avez dans le détail, pour les cultures, c'est que la France a une biocapacité de 1,17 hag²⁹ et son empreinte est de 0,88 hag. Ça veut bien dire

29. Hag : hectare global. Unité utilisée pour mesurer l'empreinte écologique.

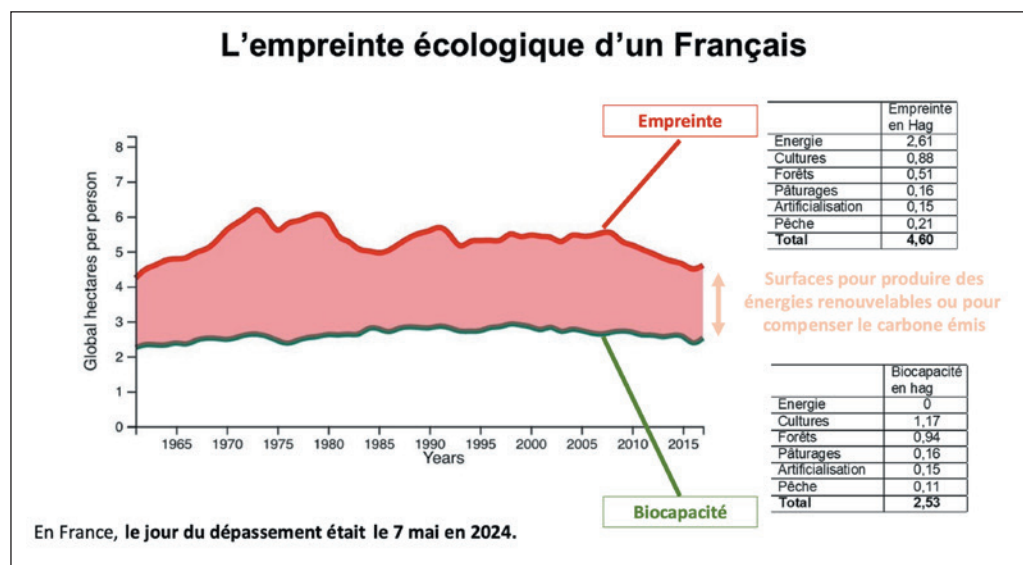


Figure 28

Empreinte écologique en surface des Français.

qu'elle produit légèrement plus que ce dont elle a besoin. Cependant, le seul différentiel est sur l'énergie. La France importe toute son énergie fossile, c'est pour ça que l'empreinte est supérieure à la biocapacité. Si on appliquait la politique des accords de Paris en France, c'est-à-dire

arriver à une empreinte carbone neutre³⁰ en 2050, la ligne rouge devrait logiquement rejoindre progressivement la ligne verte. C'est là tout l'enjeu qu'on a demain.

30. Empreinte carbone neutre : situation où les émissions de CO₂ sont compensées par les capacités d'absorption de la Terre.

Conclusion et ouverture

Ce qu'on va devoir faire pour notre stratégie, c'est :

- développer des pratiques plus agroécologiques³¹ qui réduisent notamment l'usage des pesticides ;
- implanter beaucoup plus de fruits et légumes, de protéagineux ;

31. Pratiques agroécologiques : pratiques agricoles respectueuses des équilibres naturels.

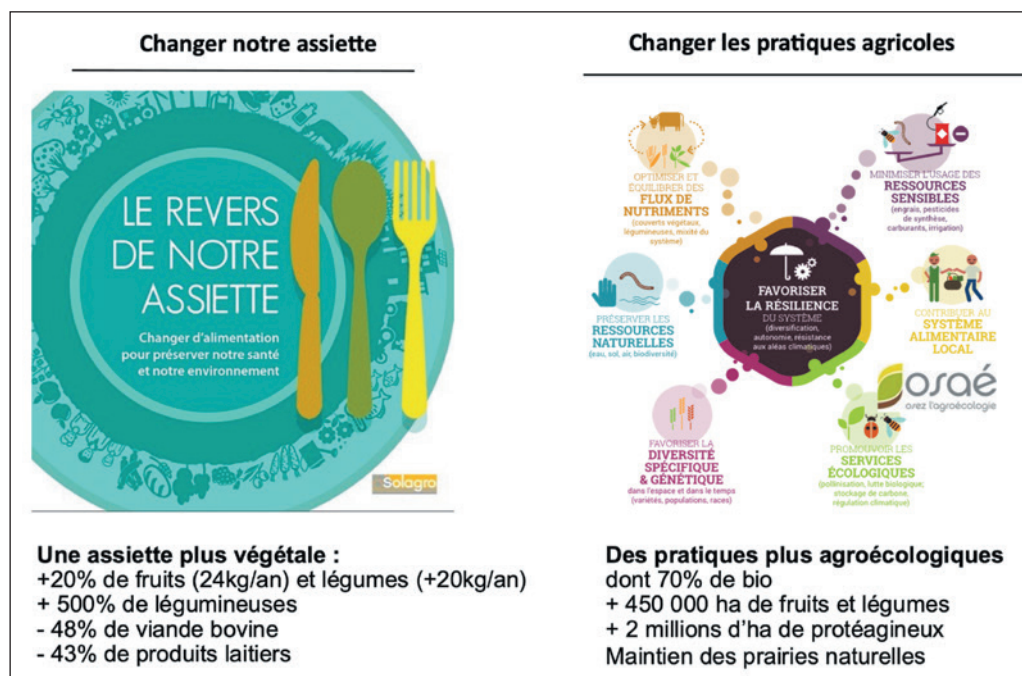


Figure 29

Recommandations du changement de régime alimentaire.

– et réduire de moitié notre consommation de viande et de produits laitiers (Figure 29).

Pour finir, on n'a peut-être pas beaucoup parlé de biodiversité, mais vous savez quand même qu'elle se porte mal. Ceux qui ont regardé le reportage de Yann Arthus-Bertrand l'ont entendu : ce qu'on nous annonce n'est pas bon et il serait temps de réagir (Figure 30).



Figure 30

Pancarte durant une manifestation en faveur de l'écologie.

Partie 2

Bien manger

Quelles sources d'avenir pour les protéines alimentaires ?

Verena Poinso est directrice de recherche CNRS au Centre Interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux (CIRIMAT).

Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'examiner les sources complémentaires et alternatives à la viande permettant de répondre à notre besoin en protéines alimentaires. La **figure 1, en haut** résume le contexte du besoin en protéines. Intéressons-nous aux 17 % de protéines que nous avons dans le corps humain et aux 9 acides aminés essentiels¹ qui ne sont disponibles que par

la nourriture (voir le chapitre de Jean-Michel Lecerf).

Un premier point à noter est qu'il est nécessaire de compenser les protéines qui se dégradent dans notre corps (0,8 g de protéines par kilo par personne et par jour), au moyen de notre alimentation. Mais il faut signaler que nous ne sommes pas loin d'en consommer le double en France. Pourtant, nous ne sommes pas des goinfres mangeant des quantités hallucinantes de nourriture, mais nous avons une alimentation déséquilibrée, alors que l'on dit habituellement que les

1. Acides aminés essentiels : acides aminés que notre corps ne peut pas fabriquer. On doit les obtenir par l'alimentation.

Français ont une culture gastronomique tout à fait intéressante.

Il faut aussi garder à l'esprit que l'alimentation représente 25 % (Figure 1, en bas) des émissions

de gaz à effet de serre² produits

2. Gaz à effet de serre (GES) : gaz qui retiennent la chaleur dans l'atmosphère, contribuant au réchauffement climatique (ex. : CO₂, méthane).

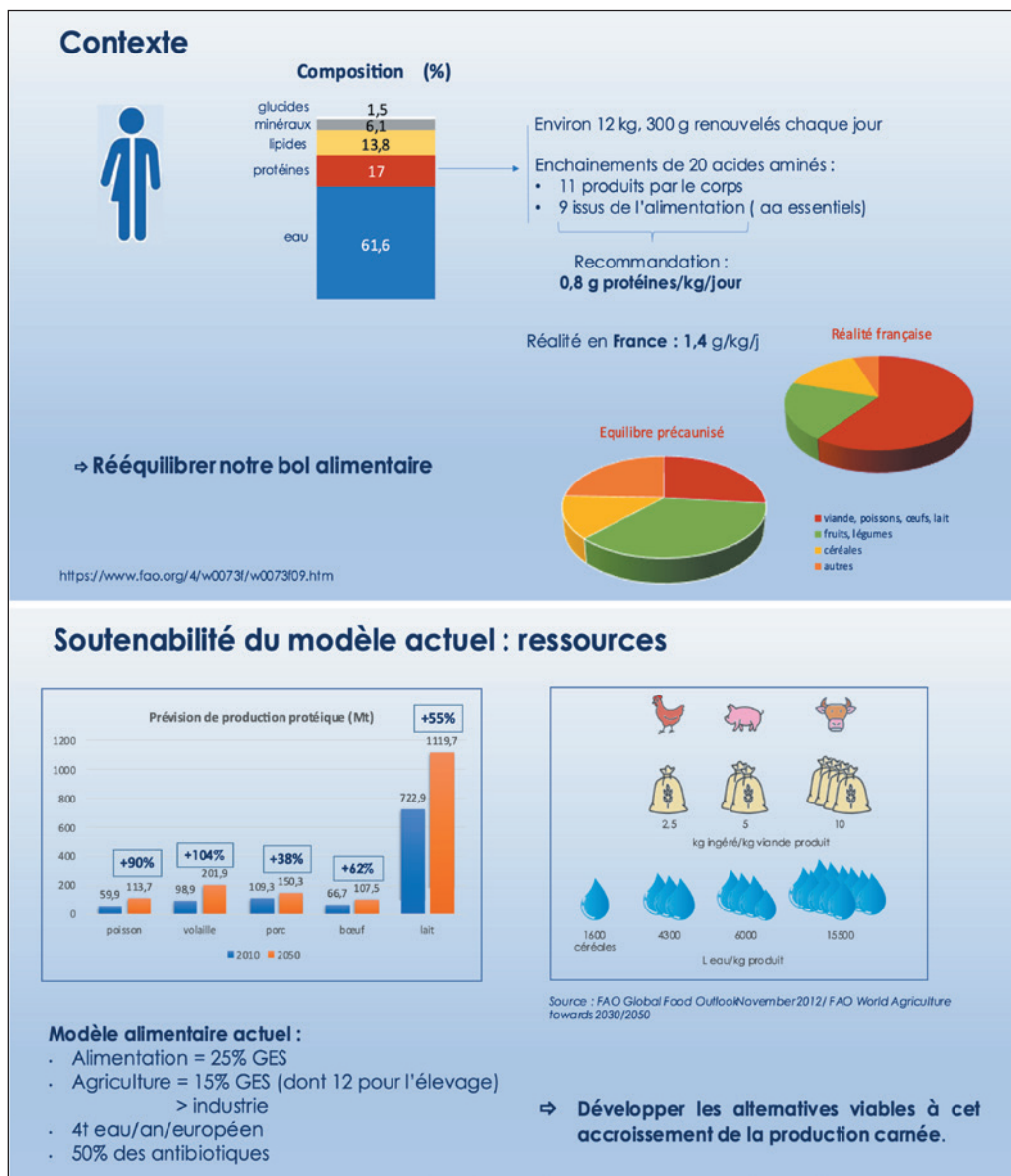


Figure 1

Le contexte du besoin en protéines. Panel du haut : le besoin en protéines. Panel du bas : l'impact environnemental et sanitaire des élevages au regard de la croissance projetée du besoin.

par l'humanité, et que, sur ces 25 %, 14,5 % proviennent de l'élevage.

Autre point à savoir (**Figure 1, en bas**) : il y aura un accroissement de la consommation de viande (ou du moins de protéines), lié à l'augmentation de la population mondiale, mais aussi lié à une augmentation du pouvoir d'achat des pays qui sont à forte croissance actuellement, et qui ont pour standard notre mode de vie occidental. Il va donc falloir développer une alternative viable pour assumer cette nouvelle croissance.

1 Les sources de protéines alternatives

Quelles sont les sources de protéines alternatives ?

Le chapitre de Romain Joly montre que les **plantes légumineuses**, les protéagineuses³, sont une source de protéines particulièrement importante.

Les **microalgues** sont une autre source : ce sont les zones de couleur verte et troubles que l'on retrouve à la surface de l'eau. Très petites, elles ne se voient pas à l'œil nu. Deux espèces en particulier sont déjà validées pour l'alimentation, à savoir la *spiruline* et la *chlorelle*.

Du côté des **insectes**, nous verrons deux espèces comme exemples : le ver de farine et le grillon domestique.

Côté **champignons filamenteux**, nous verrons l'exemple de *Fusarium Venenatum*.

Enfin, nous examinerons assez rapidement le cas des **levures**.

Pour utiliser une source de protéines comme aliment alternatif, il faut savoir si elle a réellement une valeur nutritive équivalente à la viande. La première chose est donc de considérer les valeurs nutritives pour 100 g de matière sèche⁴, pour mieux pouvoir comparer ces organismes très différents (**Figure 2**). Il apparaît clairement que, pour 100 g de matière sèche, tous ces nouveaux produits pour l'alimentation (la barre a été placée au niveau du steak) sont plus énergétiques que la viande rouge. Et si on regarde les barres orange, ces produits ont une production en protéines équivalente à la viande.

Un autre point qu'il est très intéressant de regarder est la teneur en lipides⁵, puisque ce sont des aliments qui sont beaucoup plus maigres que la viande. Les acides gras polyinsaturés dont nous avons besoin sont présents dans ces entités, surtout en ce qui concerne les insectes ; ils sont aussi présents dans la spiruline, en particulier, ou dans les champignons filamenteux. Si les protéines issues des microalgues ne couvrent pas la totalité du spectre en acides aminés essentiels, on peut retrouver une distribution complète en combinant les sources.

Les insectes, en tant qu'animaux, présentent la totalité du spectre des acides aminés dont nous avons besoin pour nous développer.

4. Masse sèche : masse qui reste après avoir retiré toute l'eau que contient un produit.

5. Lipides : matières grasses présentes dans les aliments et le corps, essentielles en quantité raisonnée.

3. Plante protéagineuse : plante cultivée principalement pour ses graines riches en protéines (ex. : pois, fèves, soja).

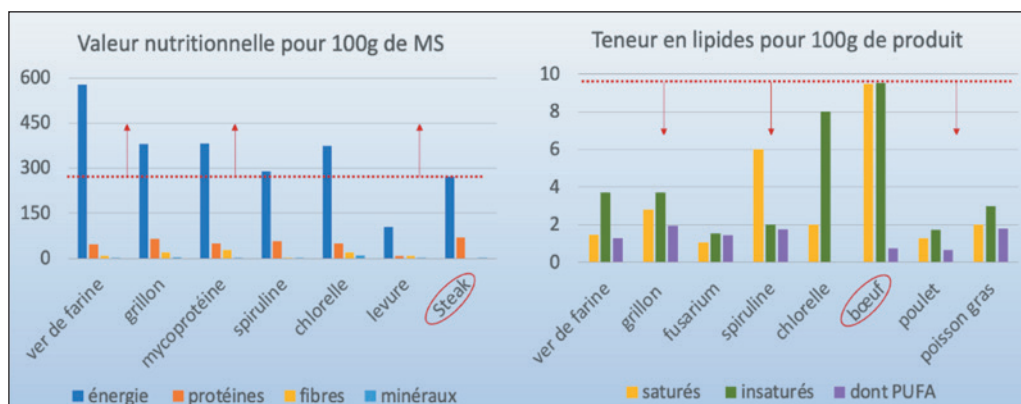


Figure 2

Valeur nutritive des sources de protéines.

Il est aussi important de noter que la spiruline a un apport en fer assimilable (c'est important car ce n'est pas parce qu'il y a du fer qu'il est assimilable pour nous), qui est très supérieur à la viande rouge. Il existe donc une alternative, y compris pour nos besoins en fer.

2 La production industrielle de ces nouveaux aliments

Savoir que ces nouveaux aliments sont potentiellement de bons aliments ne suffit pas : il

faut être capable de produire suffisamment de matière alimentaire à partir de ces sources alternatives pour couvrir le besoin. Examinons donc leurs modes de production.

Les insectes sont des animaux, on utilise donc une procédure d'élevage. L'intérêt pour les insectes est qu'il y a une très faible emprise au sol⁶, puisqu'on les élève dans de grandes structures en verticalité, comme vous pouvez le voir sur la **figure 3** qui présente des empilements de centaines de box contenant chacun des milliers d'individus.

Cela permet donc de produire énormément de matière sur très peu de surface au sol. Toutefois, les enceintes doivent être maintenues autour de 30 degrés.

En ce qui concerne les micro-algues et les champignons



Figure 3

Élevage d'insectes industriels en empilements de boîtes : à gauche, chez Ynsect ; à droite, chez Micronutris.

6. Emprise au sol : surface de terrain occupée par une construction ou une activité.

filamenteux, on utilise des systèmes liquides (**Figure 4**). La façon la plus empirique⁷ (mais pas forcément la plus *ad hoc*⁸ pour le contrôle sanitaire) est de les cultiver en bassins ouverts. Mais ce qui se développe le plus, ce sont les serres aquacoles⁹.

C'est une production en présence de lumière et d'eau, que l'on peut aussi remplacer dans les systèmes qui sont prévus pour les levures, à savoir les grands fermenteurs industriels¹⁰.

Qu'en est-il du stade de développement industriel concernant ces aliments alternatifs ?

7. Empirique : basé sur l'expérience directe, sans passer par une théorie scientifique rigoureuse.

8. *Ad hoc* : expression latine signifiant « spécialement conçu pour un usage précis ».

9. Serres aquacoles : grandes structures fermées, souvent en verre ou en plastique, où l'on cultive dans l'eau des organismes comme les microalgues ou des poissons.

10. Fermenteur industriel : machine permettant la culture de micro-organismes (levures, bactéries) à grande échelle dans de grandes cuves chauffées et fermées.

Pour les insectes, on compte déjà en Europe une bonne dizaine de très grandes installations qui permettent l'élevage des insectes, dont trois sont en cours d'installation en France (Ynsect, Innovafeed et Agronutris), l'une étant validée pour l'alimentation humaine.

En ce qui concerne les microalgues, il y a de très nombreuses fermes aquacoles dans le monde, principalement implantées aux États-Unis, en Afrique, en Europe et au Japon. En France, nous disposons de trois grands groupes : l'un produit ses microalgues en tant que fertilisant et nourriture destinée aux animaux (Algae), les deux autres élaborent des compléments alimentaires (AlgoSource et Greensea).

La production de protéines par les champignons filamenteux n'est pas réellement présente en France, mais il y a de très grands groupes ailleurs. Ainsi, le groupe Quorn présente une spécificité puisqu'il produit la chaîne complète de valeur : il démarre par le fermenteur et vous livre un plat cuisiné en sortie. Il y a deux autres grands groupes, Enough et MAASH, qui produisent chacun 10 000 tonnes



Figure 4

Modes de production des algues : serres aquacoles, bassins ouverts et photofermenteurs.

de mycoprotéines¹¹ par an. En France se développe une petite start-up très prometteuse : Myctechs. Elle mise sur le fait qu'il n'est pas forcément nécessaire de s'intéresser à la seule protéine : en s'intéressant à tout le réseau filamenteux des champignons, on pourrait obtenir des produits finis avec une texture qui pourrait s'approcher de la viande.

Quant aux levures, elles ont toujours existé dans l'agroalimentaire : elles sont utilisées en brasserie, dans les produits laitiers, en boulangerie. Lesaffre est l'un des géants français du domaine.

La chimie va continuer à être là pour tout ce qu'elle fait déjà pour l'agroalimentaire, c'est-à-dire pour le traitement sanitaire dans les élevages, pour tout ce qui a trait au nettoyage, aux conditions de culture, au suivi qualité, à la conservation, à la transformation, à l'amélioration organoleptique¹²...

3 Avantages et limites de ces nouveaux aliments

3.1. Les insectes

Commençons par les insectes, parce qu'ils présentent un très grand nombre d'avantages.

Ils ont un taux de conversion entre la nourriture qu'on leur donne et leur valeur nutritive bien supérieur à celui des animaux d'élevage. Ils ont un

impact environnemental qui est certes supérieur au végétal, à l'agriculture standard, mais bien inférieur à celui de l'élevage de bovins (ou d'ovins). La capacité de production est énorme avec une faible emprise au sol, et les insectes couvrent la totalité de nos besoins en acides aminés, en graisses...

Mais leurs limites sont également majeures. La première d'entre elles est l'absence absolue d'appétence des Occidentaux pour ce genre d'aliments, alors que, il faut en avoir conscience, 2 milliards et demi d'êtres humains en consomment déjà de façon périodique. Le marché actuel pour la consommation humaine est faible : à ce niveau, les humains représentent 5 % du marché, le reste étant destiné à l'aquaculture. Certains pays comme la Finlande ont déjà décidé de les introduire pour partie dans la farine de pain. Ces insectes n'étant pas consommés de façon usuelle en Europe, ils sont sous le sceau de la réglementation « Novel Food » qui est extrêmement contraignante, ce qui représente également une limite à leur développement.

3.2. Les microalgues et les champignons

Concernant les microalgues, l'acceptabilité par le consommateur est meilleure. Ce sont des aliments extrêmement diététiques, car à faible teneur en matières grasses, ils contiennent les lipides essentiels et les protéines en quantité suffisante. De plus, leur culture demande très peu de technicité de production.

11. Mycoprotéine : protéine purifiée à partir du champignon.

12. Organoleptique : qui concerne les qualités perçues par les sens (goût, odeur, texture, couleur).

Néanmoins, ils posent des problèmes organoleptiques : en général, ils ont une vilaine couleur pour nos yeux et une texture qui n'est pas sympathique pour nos papilles. Leur goût est fort également. Ils posent aussi des **problèmes de digestibilité**, car ils possèdent une certaine proportion de polysaccharides¹³ et de chitines¹⁴ qui engendrent des problèmes de transit.

Comme pour les insectes, on a aussi très peu de recul, sur l'impact sanitaire, de leur utilisation récurrente, quotidienne, dans l'alimentation. Certaines **allergies massives** ont déjà été signalées, en particulier pour la **microalgue spiruline**, car elle a des allergènes qui sont très proches de ceux des crustacés qui déclenchent, de façon usuelle, de fortes allergies.

Bien que nous consommions de façon habituelle la partie aérienne des champignons, le sporophore, nous n'avons pas pour usage de manger les filaments qui se trouvent dans le sol. Leur consommation est donc également sous contrôle de la réglementation « Novel Food ».

3.3. Les levures

Les levures, vous l'avez vu sur les diagrammes que j'ai présentés au départ, ne présentent pas un grand intérêt

nutritionnel, mais elles sont utilisées historiquement à des fins de conservation et de génération de goût, même si leur texture est désagréable. Étant donné qu'elles ne sont cultivées que dans des fermenteurs, elles ont aussi un impact environnemental important.

Si je vous parle des levures, c'est parce qu'il y a un processus spécifique (qui s'appelle la « fermentation de précision »), qui est obtenu à partir d'une levure en particulier, *Pichia Pastoris*, dont le génome est parfaitement connu et maîtrisé. Cela permet de construire des OGM¹⁵, qui sont capables de synthétiser de manière importante et très propre certaines protéines ayant une forte valeur ajoutée. Ces levures présentent un intérêt soit pour l'industrie agroalimentaire, en additifs alimentaires, soit à des fins de santé, pour donner des éléments qui sont importants, qui peuvent se formuler sous forme d'alicaments¹⁶ ou simplement de formulation médicamenteuse. Cependant, leur coût de production est extrêmement élevé, car leur coût de développement est énorme pour très peu de volume produit. Ce principe de production n'est donc pas compatible avec une alimentation planétaire.

13. Polysaccharides : grosses molécules formées de plusieurs sucres (glucides) liés entre eux.

14. Chitine : substance dure présente dans les carapaces d'insectes et à la surface des champignons, difficile à digérer pour l'humain.

15. OGM : organisme génétiquement modifié, dont l'ADN a été modifié pour lui donner des caractéristiques nouvelles.

16. Alicament : aliment qui apporte un bénéfice pour la santé, en plus de nourrir.

Conclusion

- Les protéines végétales sont, dans l'imédiat, les alternatives à la viande les plus adaptées. Leur acceptabilité est forte, mais elles présentent un problème de saveur, de texture, de rendement de culture. De plus, les terres arables se dégradent, sont peu extensibles, certaines pratiques agricoles sont à améliorer (labour, engrais, produits phytosanitaires...), et un risque climatique pèse sur la production.
- Les insectes présentent un apport nutritif proche de celui de la viande, une forte capacité de production, un faible besoin en surfaces, mais ils souffrent de leur image, de leur goût et de l'impact de leur production (eau, énergie). Ils sont parfois riches en chitine et nous avons peu de recul sur leurs impacts.
- Les microalgues et mycoprotéines sont riches et acceptables par le consommateur, mais posent un problème de couleur, de digestibilité, de coût à l'investissement et de paysage (multiplication d'usines). Là encore, nous avons peu de recul sur leurs impacts.

L'idée n'est en aucun cas de remplacer en totalité la viande, mais de venir compléter l'offre face à la demande en protéines. Une seule source protéique « nouvelle » n'est sans doute pas la solution complémentaire évidente. Nous sommes des omnivores, il ne sert à rien que nous devenions tous végétariens, et cela n'aurait pas vraiment de sens pour notre métabolisme. Mais notre consommation actuelle et surtout à venir de viande est telle qu'il faut lui trouver un substitut, au moins partiel.

Terminons par les recommandations qui sont nécessaires pour une alimentation durable.

Il faut éduquer les populations. Ne pas dépasser nos besoins nutritionnels est un point important pour l'alimentation mondiale, parce que, même si cela a trait à la géopolitique et au climat, il faut garder à l'esprit qu'une personne sur onze dans le monde souffre de la faim, alors qu'une personne sur trois est en surpoids ou obèse.

L'autre point, c'est qu'il faut accroître notre part de végétaux protéagineux qui contribuent en plus à enrichir naturellement les sols.

L'équilibre dans notre assiette française n'est pas idéal : il nous faut limiter les éléments transformés (trop de sel, sucres et graisses), accroître la part des céréales et fruits secs et, bien sûr, limiter le gaspillage alimentaire.

Il faut enfin s'ouvrir à de nouvelles sources alimentaires. Le problème est que cela requiert du changement et que le changement effraie.

Il faut un engagement politique pour accompagner le changement : intégrer les impacts sur l'ensemble des filières, promouvoir l'agroécologie, promouvoir les alimentations alternatives, encadrer l'industrie agroalimentaire, obtenir l'adhésion et la collaboration des milieux agricoles.

Je remercie le comité de prévention et de précaution du ministère de l'Écologie, qui m'a fait confiance pour présenter les résultats figurant dans un rapport qui est disponible en ligne¹⁷.

17. Rapport du CCP « Quelle alimentation humaine pour demain ? Les nouveaux aliments : cas des insectes et des microalgues ». https://cpp.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/IMG/pdf/cpp_-_2024_-_quelle_alimentation_humaine_pour_demain.pdf

Les protéines végétales, catalyseurs d'innovation pour une alimentation durable

Romain Joly est directeur de l'entité des protéines alternatives de la société Roquette. Il a plus de douze années d'expertise en industrie agroalimentaire.

Introduction

Les protéines végétales sont un sujet dont on parle beaucoup, et elles jouent un rôle clé dans la transition alimentaire qui est aujourd'hui nécessaire. Ce chapitre a pour objectif de remettre la chimie dans le contexte de la protéine végétale, et les protéines végétales dans le contexte des enjeux mondiaux de cette transition alimentaire.

Commençons par une présentation rapide de la société Roquette.

C'est une société agroalimentaire et pharmaceutique originaire du nord de la France qui existe depuis quatre-vingt-dix ans. Cette entreprise familiale développe des ingrédients d'origine végétale qui permettent non seulement une alimentation plus saine, mais aussi d'améliorer les traitements médicaux, ainsi que la

performance et la durabilité de certains matériaux. Pour résumer, vous mangez ou vous palpez des ingrédients Roquette dans votre vie de tous les jours. Dans votre dentifrice, il y a majoritairement du sorbitol, un polyol acariogène¹, qui peut être produit par notre société. Vous consommez des amidons, dans le pain, qui servent à en améliorer le profil nutritionnel ou la texture. Dans vos médicaments, vous consommez des excipients, c'est-à-dire le véhicule du principe actif², qui sont peut-être des excipients Roquette. Dans la nourriture pour les nourrissons également, vous pourrez trouver des

maltodextrines³, également des produits Roquette. Pour la nutrition de vos animaux de compagnie, ou à la surface de votre papier, de votre magazine, ou encore dans la masse ou le surfacage de vos cartons, il y a des produits Roquette. Ces ingrédients font donc partie de votre vie courante, et nous espérons qu'ils vous plaisent. Évidemment, Roquette n'est pas forcément connue puisque nous ne vendons pas nous-mêmes ces ingrédients aux consommateurs, mais vous en consommez tous les jours.

Roquette est présentée en quelques chiffres sur la **figure 1**. Mais, dans ce chapitre, concentrons-nous sur les deux éléments du bas qui montrent que nous sommes aujourd'hui le leader mondial des protéines de pois et le pionnier en protéines de fève. Nous sommes donc un leader mondial en protéines qu'on peut appeler «alternatives» parce qu'elles viennent parfois substituer des protéines animales, mais aussi substituer des protéines végétales céréalieres plus historiques et traditionnelles, comme le blé, dans certaines applications.

La **figure 2** résume quatre-vingt-dix ans d'histoire chez Roquette, dont quarante ans d'histoire dans le blé, et sa protéine (le gluten de blé), très utilisée dans les applications pâtisseries, pains, et

1. Acariogène : qui ne nourrit pas les bactéries responsables des caries.
2. Principe actif : substance responsable de l'effet thérapeutique d'un médicament.



Figure 1

Chiffres clés de la société Roquette.

3. Maltodextrines : glucides complexes issus de l'hydrolyse partielle de l'amidon (maïs, blé, pomme de terre...). Elles sont utilisées comme agents de charge, épaississants ou sources d'énergie rapides.



Figure 2

L'histoire de Roquette dans les protéines végétales.

autres, et maintenant vingt-cinq ans d'expérience et de leadership dans les protéines alternatives, notamment la protéine de pois. Pour une société comme Roquette, on parle de centaines de milliers de tonnes de légumineuses transformées dans nos usines.

Dans le contexte actuel, il y a un besoin mondial en protéines végétales en raison des deux grands enjeux pour la population qui passerait à 9 ou 10 milliards de personnes en 2050.

Le premier, c'est l'autosuffisance. La France jouit déjà d'une autosuffisance alimentaire en protéines, mais elle n'est pas équitable.

Le deuxième point, c'est la durabilité de nos productions agricoles. Quelques chiffres : aujourd'hui, 80 % des terres agricoles mondiales sont utilisées pour élever ou nourrir des animaux pour la

consommation de viande, et cela représente 17 % des calories que l'on consomme. Il y a un *mismatch*⁴ complet de ces chiffres par rapport à la surface des terres que l'on utilise. C'est aussi 15 % des émissions de gaz à effet de serre, ce qui est un chiffre énorme. De plus, si on garde nos habitudes de consommation, cette demande en viande devrait doubler d'ici à 2050. Cela pose un réel enjeu planétaire.

Cependant, en termes de nutrition, la population a besoin de protéines. Sur la carte de la **figure 3** apparaît la notion de disponibilité en protéines par pays. Vous pouvez voir que c'est majoritairement en bleu foncé, ce qui veut dire que, globalement, il y a aujourd'hui une autosuffisance en protéines dans le monde. Toutefois, on relève déjà des disparités :

4. *Mismatch* : mauvais appariement.

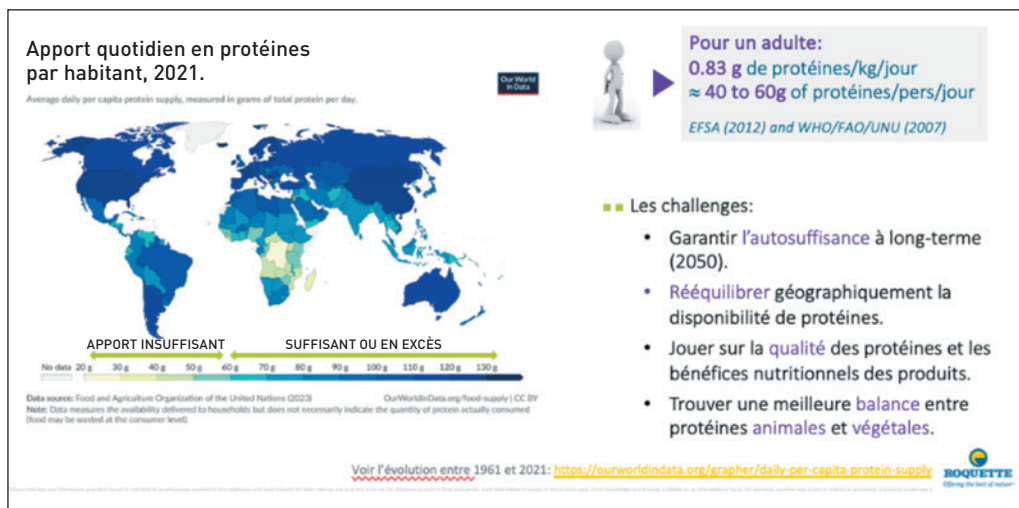


Figure 3

La production mondiale en protéines et les besoins.

on repère quelques pays qui ne sont pas du tout autosuffisants. Ces disparités vont s'accroître avec le temps et le bleu va peut-être passer à du bleu clair, parce qu'on sera de plus en plus nombreux et qu'on ne pourra pas forcément produire plus. Un des vrais sujets réside dans cette disparité inquiétante.

On parle bien ici de disponibilité en protéines. Cela ne veut pas dire que l'on consomme correctement les protéines. Dans beaucoup de pays, on en consomme parfois trop, on en gâche aussi énormément (un tiers de la nourriture qui est produite).

1 Nous avons besoin de protéines

1.1. Protéines animales ou végétales ?

Nutritionnellement parlant, nous avons tous besoin de

protéines. Une protéine, c'est une chaîne d'acides aminés⁵.

Le corps a besoin de 20 acides aminés, dont 9 essentiels que le corps ne produit pas et qu'il faut donc consommer.

Une chose importante sur le plan nutritionnel est donc de disposer de l'ensemble de ces 9 acides aminés essentiels afin qu'ils soient consommés par chacun. Ces acides aminés essentiels sont la valine, la leucine, la méthionine, la lysine, la phénylalanine, etc.

Si la diversité des protéines que nous devons consommer est importante, le volume l'est aussi. Cette donnée figure en haut à droite de la **figure 3** : 0,83 g de protéines par kilo de poids par jour, par adulte. Aujourd'hui, trois Français sur quatre **ne connaissent pas** les recommandations concernant

5. Acides aminés : petites molécules qui sont les briques de base des protéines.

la consommation quotidienne de protéines nécessaire par personne. Ce dernier évolue en fait avec l'âge. Quand on est très jeune, quand on est un enfant, de un à trois ans, le besoin est plutôt de 1 à 1,05 g. À l'âge adulte, ce besoin est moins important : 0,83 g environ, comme mentionné précédemment. Et quand on devient plus vieux, il remonte de 1 à 1,2 g : une personne âgée souffre souvent de sarcopénie, c'est-à-dire le fait que les muscles ont tendance à s'atrophier⁶, et on doit compléter en consommant plus de protéines.

Sur la **figure 4**, on voit que différents challenges⁷ se déclinent et se multiplient : il y a une problématique d'autosuffisance, de répartition, de qualité et de variété des

protéines qu'on consomme, et aussi d'équilibre entre protéines animales et protéines végétales.

En tant que producteur et leader mondial en protéines végétales, cela serait un peu facile de faire le procès des protéines animales, et ce n'est pas du tout le sujet, car il y a un besoin de complémentarité. Il faut combiner les viandes, les produits laitiers et les sources végétales, et pas seulement pour une question de protéines mais pour plein d'autres raisons (voir le chapitre de Jean-Michel Lecerf). Pour chaque protéine, qu'elle soit animale ou végétale, il y a du pour et du contre, comme vous pouvez le voir sur la **figure 4**. Il faut être le plus objectif possible.

En termes de teneur en protéines (ou valeur énergétique), il y a un avantage assez net pour les protéines animales. En revanche, concernant les

6. S'atrophier : perdre du volume, de la fonction ou de la force, souvent à cause du manque d'activité ou d'un problème physiologique.
7. Challenges : défis.



	 PROTEINES ANIMALES	 PROTEINES VEGETALES
Sources	Produits laitiers, viandes, poissons, œufs.	Céréales, légumineuses, légumes verts, tubercules et racines, fruits
Protéines et calories	Riches en protéines Riches en calories	Teneur inférieure à 40% Légumineuse > Céréales > Légumes verts Faibles en calories
Constituants associés	Riches en graisses saturées, en cholestérol. Faibles en graisses insaturées, en fibres, en sources de vitamines et minéraux.	Faibles en graisses saturées, pas de cholestérol. Riches en graisses insaturées, en carbohydrates complexes, en fibres, en vitamines et minéraux.
Digestibilité	Haute	Nécessite d'être <u>processées</u> pour augmenter leur digestibilité.
Score acides aminés	Haut, profil complet.	Souvent incomplet mais peut-être combiné avec une 2e source végétale pour obtenir un profil complet.
Santé	Risque plus élevée de développer des maladies chroniques (Diabète et maladies cardiovasculaires)	Risque plus faible de développer des maladies chroniques.
Durabilité	Fort impact écologique	Faible impact écologique.

Figure 4

Qualités nutritionnelles des protéines animales et végétales.

constituants associés, c'est-à-dire tout ce qui vient autour de la protéine, le végétal l'emporte. En effet, côté végétal, il y a moins de graisses saturées et insaturées, plus de fibres, plus de vitamines, plus de minéraux. Côté digestibilité, le point est plutôt positif du côté animal, car le végétal possède plus de challenges suivant la matière première, certaines pouvant être allergènes et d'autres ayant besoin d'une étape de transformation pour en améliorer la digestibilité. Sur le score acide aminé dont je viens de parler, l'apport en 9 aminoacides essentiels, l'avantage est plutôt côté animal. En revanche, côté végétal, on peut compléter en associant différentes protéines ensemble pour avoir un amino-score complet. En termes de santé, il y a un avantage au végétal principalement lié aux constituants associés mentionnés précédemment. Enfin, en termes de durabilité, on va en parler juste après, l'impact écologique est moindre pour ce qui est du végétal par rapport à l'animal.

1.2. Les avantages des protéines végétales

La **figure 5** compare l'**impact carbone de différentes sources de protéines**, avec l'exemple non seulement du pois, que l'on connaît bien, mais aussi des légumineuses de manière générale qui incluent le pois, les fèves, les lentilles... **Les légumineuses ont plein d'avantages.**

Elles améliorent la santé du sol dans les champs en apportant de la matière organique. Par exemple, quand on cultive les pois, leurs gousses restent dans le champ, ce qui laisse de la matière organique sur la terre nourrissant ainsi les micro-organismes et les insectes. Ces derniers vont créer des petits trous partout dans le sol et ainsi augmenter sa perméabilité, limitant les inondations et surtout permettant de mieux capter l'eau pour la culture suivante.

Les légumineuses captent aussi l'azote de l'air pour le fixer dans le sol, ce qui permet d'utiliser moins de fertilisants, ces derniers étant souvent azotés, produits

	Pois (jaune)	Soja	Lait de vache	Viande de bœuf
				
Teneur en Protéines g/100g	23	38	3,3	22
Impact Carbone kg CO2 eq. /kg	0,87	1,47	1,5	27,8

Figure 5

L'impact carbone des sources de protéines.

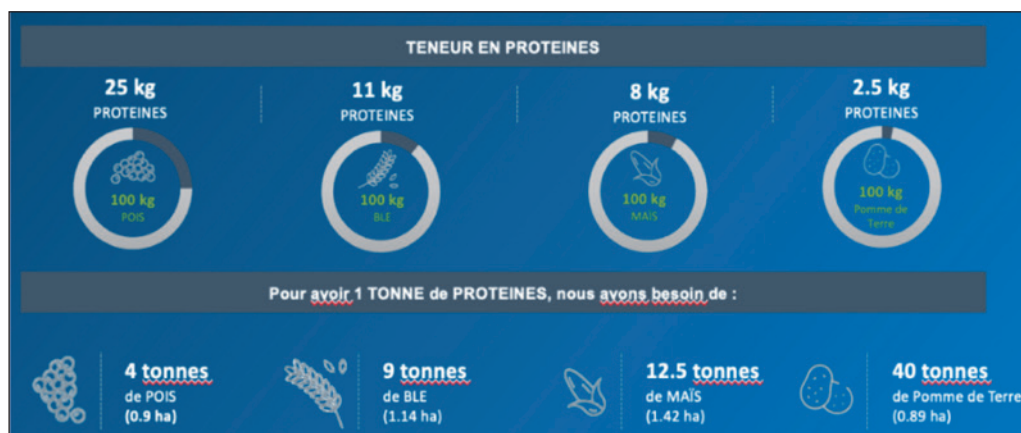


Figure 6

Comparaison des différentes protéines végétales.

de manière synthétique à base d'ammoniaque. Le pois, par exemple, est très souvent utilisé en rotation avec le blé. On aura alors besoin de moins de fertilisants pour le blé qui viendra ensuite, et le blé sera plus riche en protéines. De plus, on ne retrouvera pas ces fertilisants synthétiques polluants dans les nappes phréatiques. Les légumineuses laissent finalement le sol en bien meilleur état qu'il ne l'était quand elles sont arrivées. Ce sont en quelque sorte des superhéros des champs ! Elles consomment aussi moins d'eau : la plupart des cultures consomment près de 20 fois moins d'eau que l'élevage animal. Vous le voyez (Figure 5), en termes d'impact carbone : pour une même quantité de protéines, la quantité d'émissions par rapport à du bœuf est 32 fois moins élevée.

Le pois présente d'autres avantages par rapport aux autres protéines végétales, comme on peut le voir sur la

figure 6. Quand on regarde la quantité de protéines produites par hectare de surface, on voit (Figure 6) que ce sont les légumineuses comme le pois (ou même la fève, qui sera encore meilleure) qui produisent le plus de protéines, à égalité avec la pomme de terre. La difficulté avec la pomme de terre, c'est qu'avec la protéine viennent plein d'autres composants et beaucoup d'eau. On va produire 40 tonnes de pommes de terre, donc il faut aussi savoir quoi faire de ce qui vient à côté de la protéine, principalement l'amidon. **Le ratio protéique à l'hectare est important pour voir comment utiliser nos surfaces agricoles demain dans cette logique de transition alimentaire.**

1.3. La valeur ajoutée de l'isolation de la protéine végétale et les applications

Une question importante, et même un peu naïve, est de se dire : si on veut consommer moins de viande, pourquoi ne

consommons-nous pas du pois directement ? Il y a en fait d'autres challenges, et aussi une question d'habitude alimentaire. Si on prend des pois chiches ou des féveroles, ce sont des produits qui sont consommés dans beaucoup de pays aujourd'hui, mais plutôt dans les pays du Maghreb et autres pays orientaux. Les dahls de lentilles, par exemple, sont beaucoup consommés en Inde. Donc, pour que nous passions tous à ce genre de plats, il faudrait révolutionner du jour au lendemain nos habitudes alimentaires et notre culture gastronomique. C'est difficile et cela représente une transformation longue et assez complexe.

Les pois, comme on peut le voir sur la **figure 7**, peuvent avoir un goût assez prononcé. En termes de fonctionnalité, de solubilité ou de digestibilité, leurs performances sont assez faibles. **On a donc intérêt** à

passer du pois à la protéine du pois et à **extraire une protéine plus pure** puisqu'on va baisser la teneur en goût et augmenter la fonctionnalité, la solubilité ou la digestibilité. Cela permettra d'étendre le champ d'application de la protéine qui vient du pois, de la fève ou d'autres légumineuses.

Les applications des protéines végétales sont résumées sur la **figure 8**. On retrouve ces protéines issues des légumineuses dans des boissons enrichies en protéines, dans des snacks ou en pâtisserie, par exemple dans les barres nutritionnelles enrichies en protéines. On peut aussi les trouver dans des produits d'analogues laitiers, comme le lait d'amande, le lait de coco, le lait d'avoine... Ces laits alternatifs sont en fait assez peu riches en protéines par nature car leurs sources (le coco, l'amande...) sont peu riches. Il faut donc les compléter en protéines pour avoir

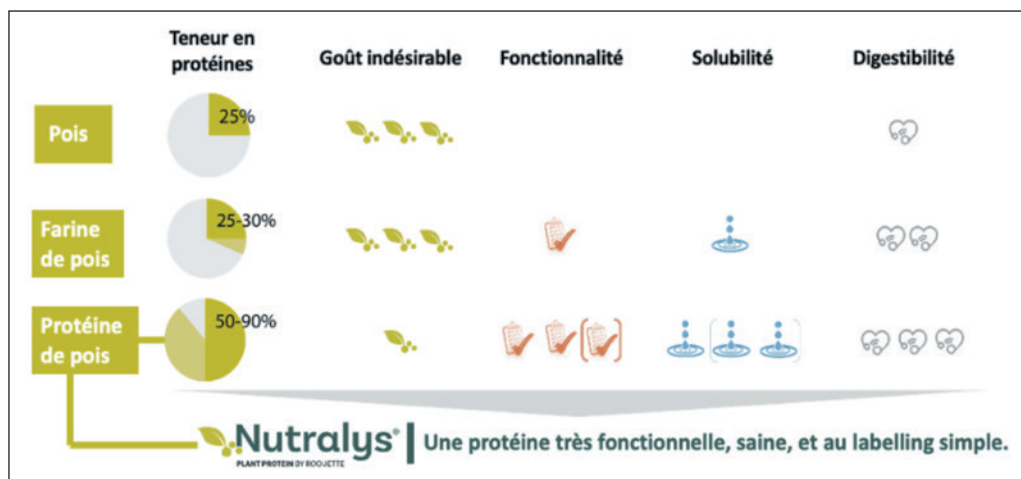


Figure 7

Valeur ajoutée de l'isolation des protéines végétales : exemple du pois.

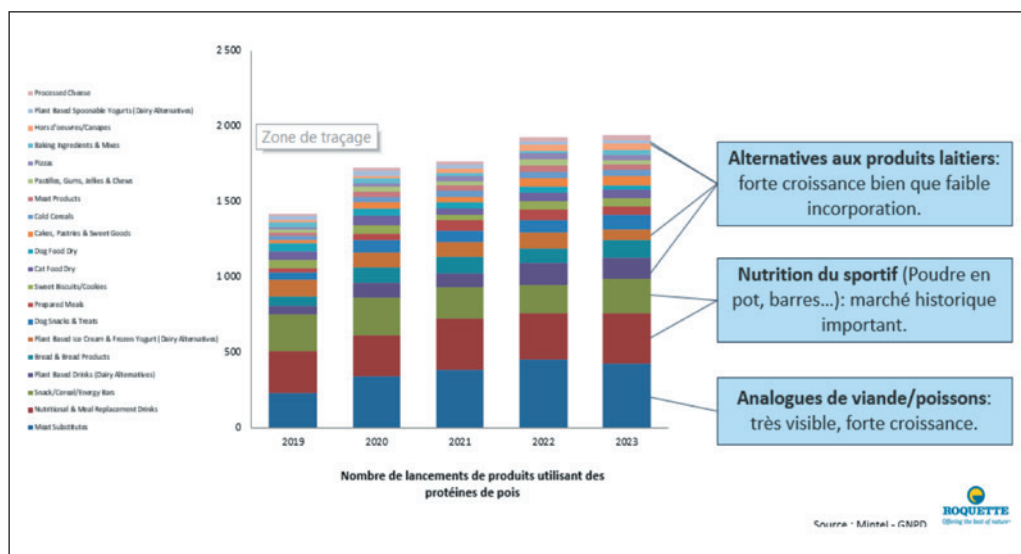


Figure 8

Évolution du marché des produits utilisant des protéines de légumineuses.

un profil nutritionnel qui soit plus proche de celui du lait de vache.

Ces protéines végétales sont aussi utilisées dans les yaourts et fromages végétaux, dans des plats salés préparés (Savory) ou dans des analogues de viande. En France, par exemple, on les retrouve dans des marques telles que HappyVore, La Vie, Accro, Garden Gourmet, qui connaissent de belles croissances et démocratisent ce type de produit.

On les utilise aussi dans la nutrition spécialisée (comme celle du sportif et celle des personnes âgées), et la nutrition médicale pour des patients qui ont des pathologies particulières. La nutrition médicale peut se faire par voie orale, mais aussi par voie entérale, donc par sonde, dans l'estomac ou directement dans l'intestin.

2 Les protéines végétales, catalyseurs d'innovation

L'évolution du nombre de produits lancés chaque année entre 2019 et 2023 (**Figure 8**) montre la dynamique d'innovation des protéines de pois. On voit qu'au début des années 2010, ces protéines de pois étaient très peu présentes dans les lancements de produits : on parlait d'une centaine de produits. Aujourd'hui, plus de 2 000 produits lancés sur le marché incluent ces protéines végétales. On constate un engouement des sociétés comme Danone ou Nestlé qui lancent tous ces produits.

L'engouement de ces sociétés est lié à la croissance de la demande des consommateurs et au changement des habitudes alimentaires. Si on prend l'exemple de la France,

une enquête (**Figure 9**) commanditée par Protéines France et Terres Univia montre différentes informations importantes.

Ainsi, un Français sur quatre a changé ses habitudes alimentaires. 31 % d'entre eux se déclarent aujourd'hui « flexitariens ». Plus de la moitié ont changé leurs habitudes alimentaires pour des raisons de santé, de nutrition et d'écologie. Un Français sur trois a une image très positive des légumineuses, mais deux sur trois avouent qu'ils ont une méconnaissance complète de ces dernières.

Il y a donc différents enjeux. Il y a une **réelle attraction des consommateurs** qui se basent sur un raisonnement puissant, des convictions personnelles fortes et le souci de l'enjeu

planétaire auquel on fait face. Mais il y a aussi une méconnaissance des produits en soi.

La **figure 10** présente l'évolution des investissements des start-up et autres sociétés dans les protéines alternatives et dans la Food Tech en général. On parle de plusieurs dizaines de milliards par an, avec un pic à 50 milliards de dollars investis en 2021. On est passé de 35 % des investissements dans l'alimentation destinés à la Food Tech – l'agriculture, l'agritech et la protéine alternative – à plus de 60 % aujourd'hui.

On a donc toutes les composantes pour catalyser l'innovation : on a les consommateurs qui suivent, les industriels qui suivent, les investisseurs qui suivent.



Figure 9

Enquête sur l'évolution des habitudes et régimes alimentaires des Français.

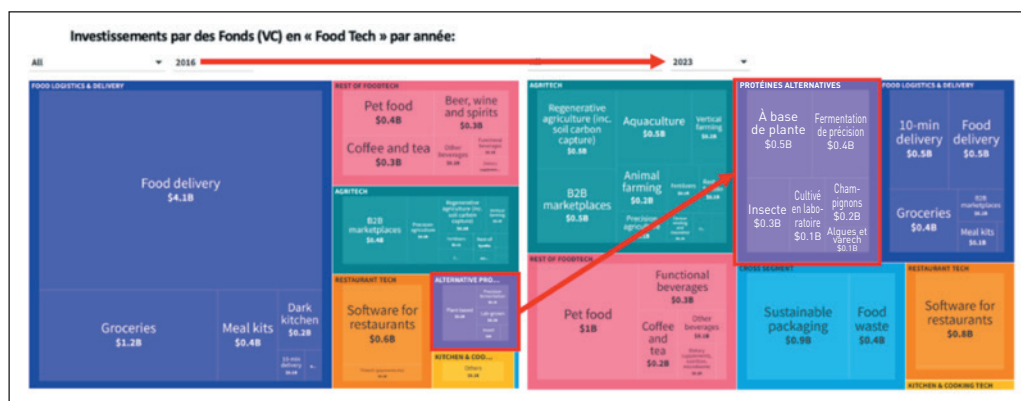


Figure 10

Dynamique d'innovation et investissement par des fonds dans la Food Tech.

Conclusion

La chimie et les processus

Quelle est la place de la chimie dans tout ça ? **En fait, la chimie est partout.** Elle est à tous les stades de la chaîne de valeur dès l'agriculture. Cela peut être dans les engrais, les protections des cultures, le développement des semences, les contrôles qualité, les analyses, etc. La chimie réside aussi dans l'extraction (qui est plutôt notre métier), et la formulation chez nos clients, avec des problématiques d'émulsification, de texturation, d'enzymes, de fermentation, d'amélioration sensorielle, d'arômes... La chimie (voir le chapitre de Hervé This) est aussi dans l'usage fait par les consommateurs à travers la cuisine.

Terminons par les procédés de fabrication (**Figure 11**), parce qu'une des difficultés réside dans le fait que **les consommateurs demandent que les produits et les ingrédients soient le moins « processés » possible.** Un de nos rôles est donc d'avoir des procédés d'extraction qui soient le plus mécaniques (et peut-être le moins

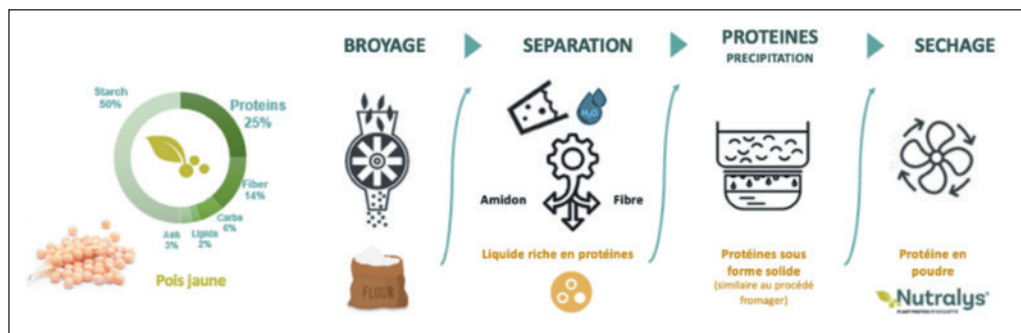


Figure 11

Processus de fabrication des protéines de pois chez Roquette.

chimiques) possible, **mais** pour arriver à cela, **il faut aussi comprendre ce qui se passe au niveau moléculaire**. De plus, en cas de besoin de fonctionnalités plus poussées demandées par certaines applications, telle la nutrition médicale, on peut faire appel à d'autres technologies comme l'hydrolyse⁸, la fermentation⁹ ou des techniques chimiques.

8. Hydrolyse : réaction chimique où une molécule est décomposée par l'eau.

9. Fermentation : processus biochimique sans oxygène, utilisé par certains micro-organismes (levures, bactéries) pour produire de l'énergie. Elle transforme les sucres en alcool, en acides ou en gaz.

Les secrets de l'olfaction – Voyage au cœur du sens de l'odorat

Claire A. de March est experte en biologie cellulaire et biochimie au service de l'étude de l'olfaction. Elle est lauréate du prix Irène Joliot-Curie de l'Académie des sciences pour ses travaux sur l'élucidation structurale des récepteurs olfactifs humains à l'Institut de Chimie des Substances Naturelles, CNRS, UPR2301, à Gif-sur-Yvette.

Monsieur Puech est doctorant en première année à l'Institut de Chimie des Substances Naturelles (ICSN, CNRS), sous la direction de Claire de March. Ses travaux portent sur les récepteurs olfactifs, dans le but de mieux comprendre leur structure et leur fonctionnement. Sa recherche s'appuie sur une approche interdisciplinaire combinant biologie expérimentale et modélisation informatique.

Introduction

L'odorat est l'un de nos cinq sens. Il nous permet de percevoir les odeurs en détectant des molécules volatiles présentes dans l'air. Ces

odeurs peuvent influencer nos émotions, nos souvenirs ou encore notre comportement. Mais avant cela, une première étape a lieu : les molécules odorantes doivent atteindre la cavité nasale, située derrière le nez, où commence le processus olfactif. Pour y arriver,

1. claire.de-march@cirs.fr

elles peuvent suivre deux chemins différents (**Figure 1**) : la voie ortho nasale, utilisée quand on respire une odeur par le nez, ou la voie rétro nasale, qui intervient quand on mange. Lors de cette dernière, les molécules passent de la bouche à la cavité nasale en remontant par l'arrière du larynx. Contrairement à une idée répandue, ce n'est pas uniquement la langue qui nous fait « goûter » les aliments. Il convient donc de poser quelques définitions afin de mieux comprendre les sensations complexes ressenties lors de la dégustation d'un aliment.

Saveur, odeur et goût

Les bourgeons du goût, présents sur notre langue, ne

détectent que **les cinq saveurs de base : sucré, salé, acide, amer et umami**. C'est uniquement **grâce à l'odorat que l'on perçoit les arômes complexes** qui rendent chaque aliment unique. Prenons l'exemple du café : la langue détecte principalement son amertume, et tout son arôme, variant du cacao au grillé en passant par des notes florales ou fruitées, est perçu par rétro-olfaction dans notre nez. On comprend ici pourquoi il n'est pas correct de dire qu'une odeur est « sucrée » : le sucre lui-même n'a pas d'odeur et sa perception se fait uniquement en bouche, *via* les bourgeons du goût. Si le terme « odeur sucrée » est pourtant souvent utilisé, c'est parce que certaines odeurs, comme celles de la vanille ou du caramel,

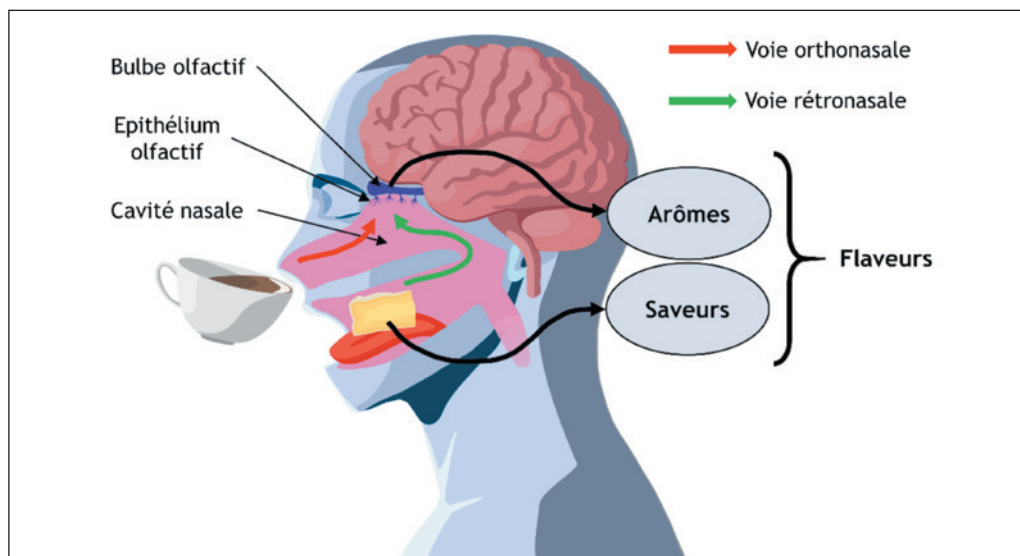


Figure 1

Physiologie de l'olfaction.

Les saveurs sont détectées sur la langue, tandis que les arômes le sont dans la cavité nasale. Pour atteindre cette cavité, les molécules odorantes peuvent emprunter la voie orthonasale ou rétronasale. Elles rencontrent alors, au niveau de l'épithélium olfactif, les neurones olfactifs qui se projettent depuis le bulbe olfactif directement dans la cavité nasale. La combinaison des saveurs et des arômes est appelée « flaveur ».

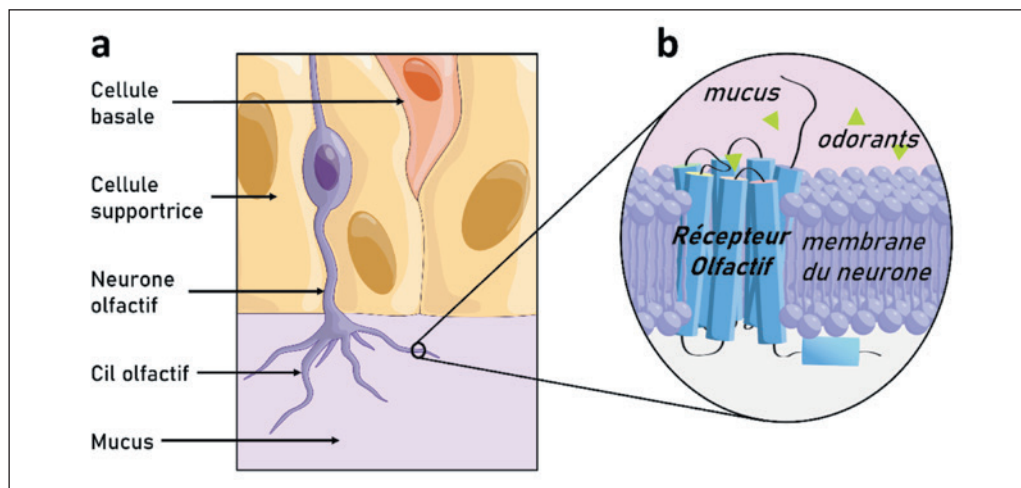


Figure 2

L'épithélium olfactif.

a. Le mucus olfactif (en rose) recouvre l'épithélium olfactif, qui est constitué de plusieurs types de cellules : les neurones olfactifs (en violet), les cellules de soutien (en jaune) et les cellules basales (en orange).

b. Les récepteurs olfactifs (en bleu), situés dans la membrane des neurones olfactifs (en violet), captent les molécules odorantes (en vert) présentes dans le mucus olfactif (en rose).

évoquent fortement des aliments sucrés. **La combinaison des saveurs (perçues en bouche) et des arômes (perçus par l'odorat) forme ce que l'on appelle la « flaveur ».** Celle-ci se combine à d'autres éléments comme la texture, la température, les sensations trigéminales (piquant, fraîcheur) et d'autres perceptions (astringence, goût métallique) pour créer l'ensemble des sensations ressenties lors de la dégustation d'un aliment. Ainsi, l'olfaction joue un rôle clé, influençant notre manière de manger et de prendre du plaisir *via* l'alimentation.

1 Fonctionnement de l'odorat : de la molécule odorante jusqu'au cerveau

Lorsqu'une molécule odorante entre dans la cavité nasale (par

la voie orthonasale ou rétronasale), elle entame son parcours vers notre perception consciente de l'odeur (Patel *et al.*, 2014). Ce processus commence dans une zone située au fond du nez : la cavité nasale. Celle-ci contient l'épithélium olfactif (**Figure 2a**), une fine muqueuse spécialisée dans la détection des odeurs. L'épithélium olfactif est composé de nombreux types de cellules, dont trois jouent un rôle central dans le fonctionnement de l'odorat et que nous allons décrire ici :

- les neurones olfactifs, directement responsables de la détection des odeurs ;
- les cellules de soutien, qui assurent le bon fonctionnement et la stabilité de l'ensemble ;
- les cellules basales, qui régénèrent régulièrement chaque type de cellule composant

l'épithélium, permettant parfois de retrouver l'odorat après une perte temporaire.

Cet épithélium est recouvert d'un mucus olfactif qui le protège du dessèchement, un peu comme la salive protège l'intérieur de la bouche. C'est d'ailleurs ce mucus qui s'écoule de notre nez lorsque nous sommes enrhumés ou malades. Les molécules odorantes, une fois entrées dans la cavité nasale, se dissolvent dans le mucus olfactif pour atteindre les cils des neurones olfactifs, où va commencer leur détection. Les neurones olfactifs se projettent directement depuis notre cerveau jusqu'à la cavité nasale. Ce sont les seuls neurones dans notre corps capables de s'exposer à l'air libre. Ils accomplissent cette prouesse en passant par de tout petits trous dans l'os de notre boîte crânienne, comme un tamis, au niveau de la lame criblée. Sur la membrane de ces cils se trouvent des récepteurs olfactifs (**Figure 2b**), des protéines se liant sélectivement aux molécules odorantes. Lorsque cette fixation a lieu, les récepteurs olfactifs déclenchent une cascade de signalisations à l'intérieur du neurone. Cette cascade conduit à la génération d'un message nerveux, qui est ensuite transmis au cerveau, au niveau du bulbe olfactif. Le bulbe olfactif est une toute petite partie de notre cerveau, située entre les sourcils, qui est entièrement dédiée à la première étape de descriptions de la perception des odeurs. Différentes parties du cerveau interprètent ensuite ce signal et le transforment en une odeur identifiable.

Les récepteurs olfactifs représentent donc la porte d'entrée du système olfactif : ce sont eux qui permettent la détection des molécules odorantes et le déclenchement du message nerveux à l'origine de notre perception des odeurs.

2 Sentir le monde avec 400 récepteurs

Pour lui permettre de détecter une large gamme de molécules odorantes, l'humain possède 400 récepteurs olfactifs différents (Malnic *et al.*, 1999). Chacun de ces récepteurs peut être activé par une molécule odorante et chaque molécule odorante peut activer un ou plusieurs récepteurs (**Figure 3**). Chaque motif d'activation, c'est-à-dire une combinaison unique de récepteurs activés parmi les 400, va être transcrit par le cerveau en une odeur. C'est ce qu'on appelle le « code combinatoire olfactif ».

Ce concept peut sembler un peu complexe. Pour mieux le comprendre, utilisons une analogie musicale. Imaginons que nos 400 récepteurs olfactifs sont les 400 touches d'un piano. Chaque molécule odorante active une combinaison particulière de touches, produisant ainsi une « note », ici olfactive. Une autre molécule activera une autre combinaison, générant une note différente. Une même touche peut participer à plusieurs notes, tout comme une molécule peut stimuler plusieurs touches à la fois. Grâce à ce mécanisme, notre système olfactif est capable de percevoir une immense diversité d'odeurs, estimée entre 10 000 et 1 000 milliards (Bushdid *et al.*, 2014).

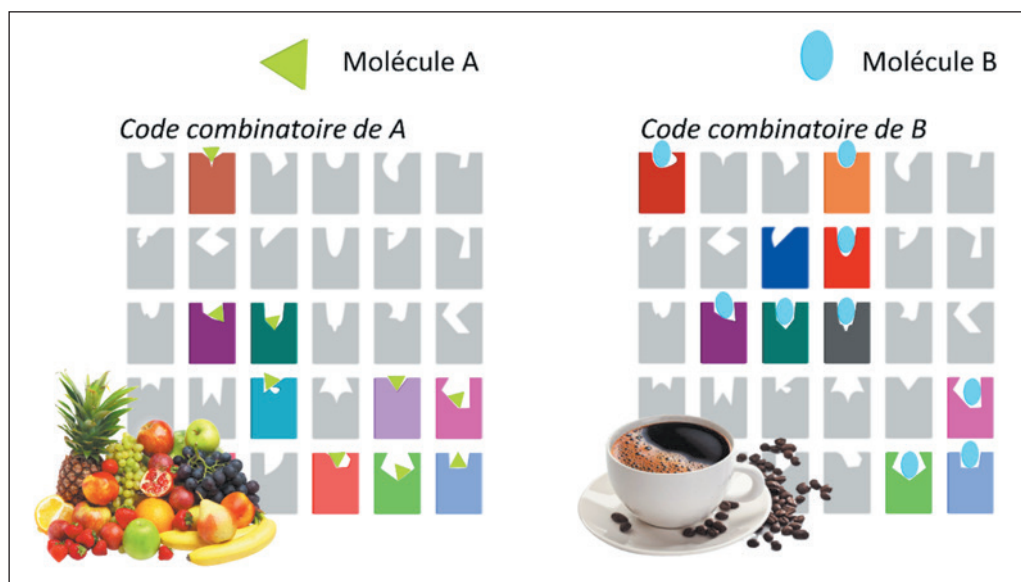


Figure 3

Le code combinatoire.

La molécule A et la molécule B activent une combinaison de récepteurs olfactifs différents (en couleur). Notre cerveau traduit cette combinaison de récepteurs activés en une odeur : une odeur de fruit pour la combinaison des récepteurs activés par la molécule A et une odeur de café pour la combinaison des récepteurs activés par la molécule B.

3 Une myriade de molécules odorantes

Le panel de molécules odorantes possible est extrêmement varié, tant par la diversité de leur structure que par leurs propriétés physicochimiques (Meister, 2015). Leur seule caractéristique commune est leur volatilité, qui leur permet d'atteindre la cavité nasale et d'être perçues par notre système olfactif. Elles peuvent être linéaires, posséder des cycles, contenir des hétéroatomes (soufre, azote, etc.) – et toutes ces propriétés influencent leur odeur (de March *et al.*, 2015). En plus d'être capable de discerner un nombre de molécules très vaste, l'olfaction est un sens précis capable de différencier

des molécules odorantes chimiquement très proches. Prenons quelques exemples :

Les gousses de vanille sont parfois recouvertes de petits cristaux blancs. Ces cristaux sont principalement constitués de vanilline (**Figure 4a**), une molécule à l'origine de la célèbre odeur de vanille. De manière intrigante, une version légèrement modifiée de cette molécule, appelée « éthylvanilline », présente une différence structurelle minimale : l'ajout d'un atome de carbone. Bien qu'elle soit synthétique (elle n'existe pas naturellement), l'éthylvanilline conserve la note olfactive typique de la vanille, tout en étant environ dix fois plus puissante. Autrement dit, il suffit d'en utiliser dix fois moins

que la vanilline naturelle pour obtenir la même intensité aromatique dans un yaourt. Cette propriété est particulièrement appréciée par l'industrie agroalimentaire, qui privilégie donc l'éthylvanilline pour des raisons économiques.

Voyons si d'autres modifications moléculaires peuvent entraîner des changements plus marqués. L'indole, par exemple, est une molécule odorante qui dégage une forte odeur d'excrément à haute concentration, mais elle peut évoquer celle des fleurs blanches lorsqu'elle est très diluée (*Figure 4b*). Cette molécule contient un hétéroatome, c'est-à-dire un atome différent du carbone, en l'occurrence un atome d'azote. Si l'on remplace cet azote par un atome d'oxygène, on obtient une autre molécule : le benzofurane. Ce dernier possède une odeur très différente, rappelant le café ou certains solvants. Ce simple changement de la nature d'un seul hétéroatome suffit donc à transformer une odeur jugée désagréable en une senteur bien plus plaisante, un changement particulièrement frappant.

Nous pouvons tenter des modifications encore plus subtiles. Certaines molécules sont composées exactement des mêmes atomes, mais leur arrangement dans l'espace est légèrement différent. Certaines sont aussi différentes entre elles que votre main droite et votre main gauche : elles sont l'image l'une de l'autre dans un miroir, mais ne peuvent pas se superposer. Pour les molécules, on parle alors d'« énantiomères ». C'est le cas de

l'acide 2-méthylbutyrique, qui existe sous deux formes, appelées « R » et « S », en raison du déplacement d'un atome de carbone (*Figure 4c*). De façon surprenante, cette légère différence a un effet important sur l'odeur perçue. La version « S » dégage une odeur fruitée, tandis que la version « R » rappelle celle du fromage. Notre nez est donc suffisamment précis pour distinguer l'odeur de molécules presque identiques.

On pourrait donc conclure qu'une simple modification dans la structure d'une molécule odorante suffit à en altérer l'odeur, parfois de manière radicale. Mais est-ce toujours le cas ? Intéressons-nous aux molécules à l'odeur musquée, très prisées dans l'industrie de la parfumerie pour leur senteur douce et caractéristique (David, 2020). Ces composés, souvent coûteux, incitent les chimistes à concevoir de nouvelles molécules synthétiques aux propriétés olfactives semblables à celles des muscs naturels, comme la muscone (*Figure 4d*). La muscone appartient à la famille des macrocycles, des structures chimiques composées d'un large anneau d'atomes de carbone. En 1888, Albert Baur, alors à la recherche de dérivés du trinitrotoluène (TNT) aux propriétés explosives améliorées, fit une découverte inattendue : son laboratoire fut soudainement embaumé d'une odeur musquée durant la synthèse de ces composés. À sa grande surprise, ce n'est pas pour un explosif révolutionnaire qu'il entra dans l'histoire, mais pour avoir découvert une nouvelle famille de composés

nitrés à l'odeur musquée, pourtant chimiquement très éloignés de la muscone. Cette anecdote illustre une réalité fascinante : deux molécules aux structures chimiques très différentes peuvent produire des odeurs remarquablement similaires. Ainsi, la relation entre structure moléculaire et perception olfactive se révèle parfois bien plus complexe qu'il n'y paraît.

En raison du grand nombre de récepteurs olfactifs, de leur extrême sensibilité et de la diversité immense des molécules odorantes, le décryptage du code combinatoire olfactif représente un défi scientifique de taille, presque insurmontable. Pourtant, les industries de la parfumerie et de l'agroalimentaire y portent un intérêt croissant. Comprendre ce code leur permettrait de concevoir des produits innovants, mieux adaptés aux préférences et aux attentes des consommateurs.

4 L'odorat, toute une histoire

L'olfaction a été pendant longtemps considérée comme un sens secondaire. Dans la littérature, de nombreux écrivains tels qu'Aristote, Descartes, Kant ou encore Schopenhauer méprisent ce sens en le décrivant par exemple comme « vulgaire ». En science, ce sens a également été délaissé. C'est seulement en 1991 que les travaux de Linda Buck et Richard Axel montrent l'existence des gènes des récepteurs olfactifs (Buck et Axel, 1991). Cette découverte fut récompensée en 2004 par le prix Nobel de médecine, soulignant l'importance de cette avancée, et

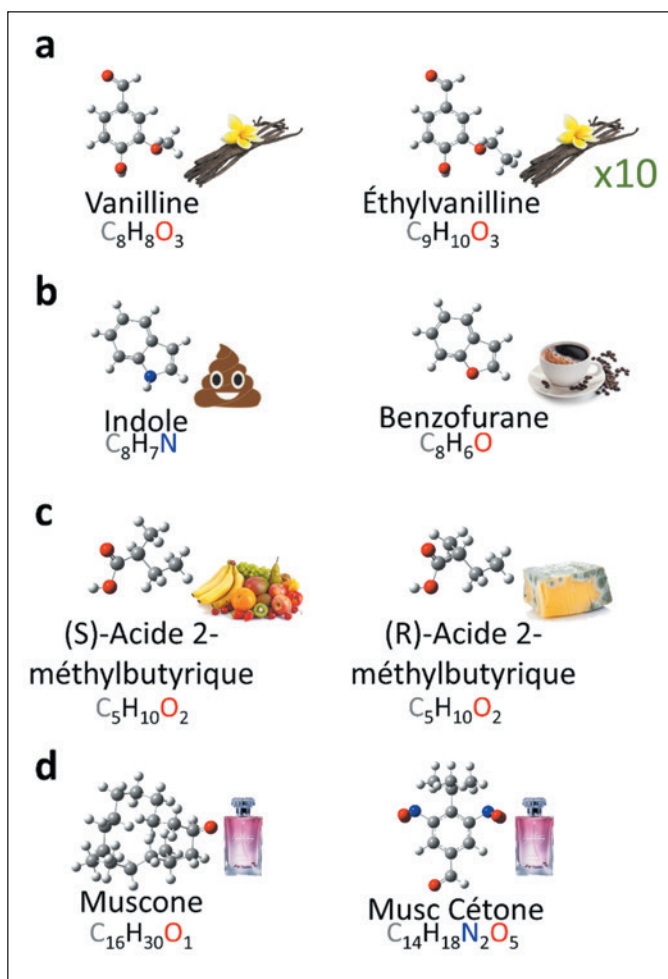


Figure 4

La sensibilité de l'olfaction face aux molécules.

Les molécules sont composées d'atomes représentés par des sphères, tandis que les tiges entre elles symbolisent les liaisons chimiques. La couleur de chaque sphère indique la nature de l'atome : gris pour le carbone, blanc pour l'hydrogène, rouge pour l'oxygène et bleu pour l'azote. En dessous du nom de chaque molécule, on trouve sa formule brute, affichée avec le même code couleur que les atomes, ce qui permet d'identifier les différences dans leur composition chimique (le chiffre après chaque lettre correspond au nombre de fois où cet atome est présent dans la molécule). À côté de la molécule, une image illustre l'odeur qui lui est associée.

a. L'ajout de quelques atomes sur la structure de la vanilline augmente la puissance de l'odeur de vanille perçue.

b. L'échange d'un atome d'azote en oxygène sur la molécule indole modifie radicalement son odeur.

b. Les énantiomères de l'acide 2-méthylbutyrique ont une odeur très distincte bien qu'elles soient l'image l'une de l'autre dans un miroir.

c. La muscone et le musc cétone ont une odeur similaire malgré les différences majeures de structures.

plus particulièrement pour le monde de l'olfaction. Si l'on y réfléchit, c'est assez fou : 1991, c'était à peine hier à l'échelle des avancées scientifiques. L'humanité avait déjà posé le pied sur la Lune et inventé Internet, et pourtant, elle ne savait toujours pas comment elle percevait les odeurs. Des révolutions technologiques majeures ont donc précédé la découverte des gènes responsables des récepteurs olfactifs. Malgré la grande avancée permise par les deux nobéliens, l'olfaction est encore un sens peu connu aujourd'hui.

Aujourd'hui, le Covid-19 a, bien malgré lui, mis en lumière l'importance de l'odorat auprès du grand public (Parma *et al.*, 2020). En effet, la perte de ce sens, appelée « anosmie », s'est révélée être l'un des symptômes marquants de la maladie. Privés d'odorat, de nombreux patients ont découvert à quel point ce sens participe à la richesse de notre expérience sensorielle, notamment dans le domaine de l'alimentation et de nos interactions sociales. L'anosmie a ainsi souligné, par son absence, le rôle central de l'olfaction dans notre quotidien. Au-delà de cet impact ponctuel, les récepteurs olfactifs suscitent un regain d'intérêt dans la recherche scientifique. Certains d'entre eux, dits « ectopiques », s'expriment en dehors de l'épithélium olfactif, et se retrouvent dans divers tissus tels que le cœur, le système respiratoire, ou encore d'autres organes. Ces récepteurs atypiques pourraient jouer un rôle dans plusieurs pathologies (Lee *et al.*, 2019). Par exemple, les

récepteurs OR51E1 et OR51E2 semblent impliqués dans la croissance de certains cancers, dont celui de la prostate (Xu *et al.*, 2000). Ainsi, ces récepteurs olfactifs longtemps négligés pourraient, dans les années à venir, devenir des cibles thérapeutiques majeures, attirant l'attention croissante de l'industrie pharmaceutique.

5 Tous égaux face à l'odorat ?

Il semble clair que notre perception des odeurs varie d'une personne à l'autre. Mais pourquoi ? Certes, les différences culturelles jouent un rôle important : une odeur de fromage, par exemple, sera généralement bien acceptée en France, alors qu'elle pourra être perçue comme désagréable dans d'autres cultures. Mais est-ce la seule explication ? Et si certaines de ces différences étaient liées à notre biologie, en particulier à la nature de nos récepteurs olfactifs ?

Parmi les quelque 400 récepteurs olfactifs que nous possédons, certains présentent des variations d'un individu à l'autre. En effet, certains gènes codant pour ces récepteurs présentent des mutations ou variations dans leur séquence d'ADN, pouvant modifier leur fonctionnement. Lorsqu'une de ces variations est suffisamment fréquente dans une population, on parle de « polymorphisme ». Ces différences génétiques peuvent influencer de manière significative la perception des

odeurs, et, par extension, notre expérience alimentaire, en altérant la flaveur des aliments (Trimmer *et al.*, 2019). Un exemple bien connu est celui de la coriandre : certaines personnes y perçoivent une agréable note herbacée, tandis que d'autres, en raison de variations génétiques spécifiques, lui trouvent une odeur de savon (Eriksson *et al.*, 2012).

Un autre cas emblématique concerne l'androsténone, une molécule présente dans la sueur des mammifères et que l'on retrouve notamment dans la viande de porc non castré (**Figure 5**). Cette molécule n'est détectée que par un seul récepteur olfactif (elle n'active qu'une seule touche

de notre piano olfactif) : le récepteur OR7D4 (Keller *et al.*, 2007). Ce récepteur présente une grande variabilité au sein de la population, ce qui signifie que votre version d'OR7D4 n'est peut-être pas la même que celle de votre voisin. Les deux principaux variants sont la version « RT », qui permet de détecter l'androsténone, et la version « WM », qui ne le permet pas. Ainsi :

- les individus porteurs de deux allèles « RT » percevront une odeur désagréable très forte, évoquant la sueur ou l'urine ;
- ceux qui possèdent un allèle « RT » et un allèle « WM » ressentiront une odeur plus douce, florale, proche de la vanille ;
- enfin, les personnes ayant deux allèles « WM » seront

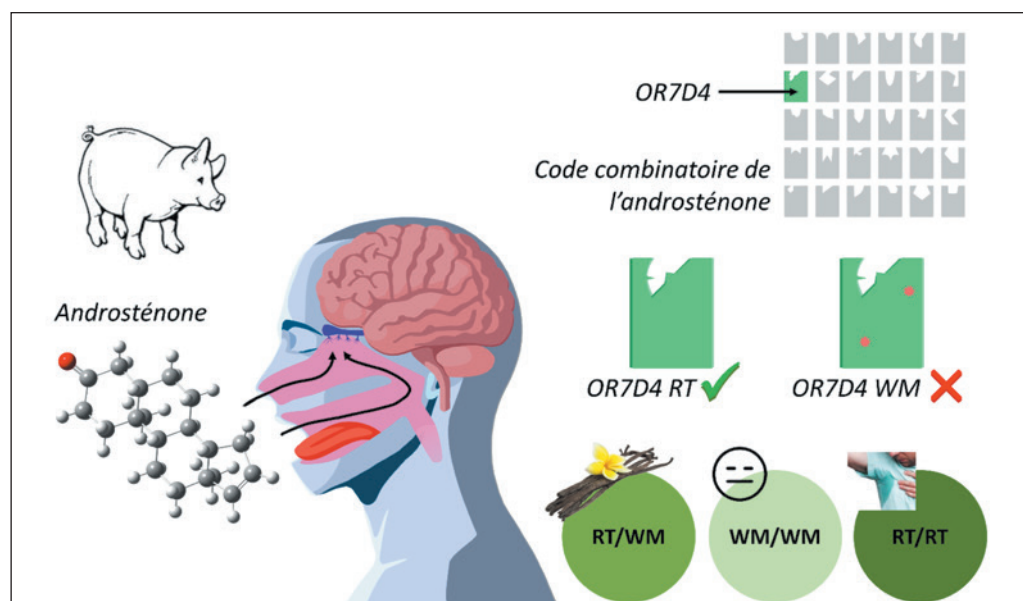


Figure 5

Les variations de perception de molécules odorantes.

L'androsténone est une molécule présente dans la viande de cochon. Elle active un seul de nos 400 récepteurs olfactifs : OR7D4. Ce gène existe sous deux variantes : la version « RT » et la version « WM ». Selon la version que nous possédons, l'androsténone peut être perçue comme ayant une odeur de sueur, de vanille, ou aucune odeur.

incapables de détecter cette molécule.

Ce polymorphisme a des répercussions très concrètes sur les préférences alimentaires. Par exemple, la majorité de la population française possède l'allèle «RT», ce qui la rend sensible à l'odeur désagréable de l'androsténone. Historiquement, cela a conduit à la pratique systématique de la castration des porcelets mâles en France, afin d'éviter cette odeur rebutante dans la viande. En revanche, au Royaume-Uni, où la fréquence de l'allèle «WM» est plus élevée, cette pratique est beaucoup moins courante, car une partie importante de la population ne perçoit tout simplement pas l'androsténone. Dans une démarche de respect du bien-être animal, la législation européenne a récemment interdit la castration mécanique des porcelets. Cette évolution réglementaire pousse désormais l'industrie agroalimentaire à trouver des alternatives pour neutraliser ou masquer l'odeur d'androsténone chez les consommateurs qui y sont sensibles.

Cet exemple illustre combien notre perception sensorielle, et en particulier notre perception des aliments, peut être influencée par notre patrimoine génétique. Ce constat ouvre de nouvelles perspectives pour l'industrie agroalimentaire, qui devra relever le défi d'une alimentation plus personnalisée, adaptée aux profils génétiques des consommateurs. L'innovation de demain pourrait ainsi reposer sur des produits capables de s'ajuster aux sensibilités olfactives de chacun.

6 Le langage invisible des odeurs

L'olfaction joue un rôle majeur dans l'attrait pour un plat. L'odeur du pain devant une boulangerie peut nous pousser à acheter une baguette ou une viennoiserie. Si le rôle de l'olfaction pour inciter à consommer est évident, des chercheurs ont montré que l'influence de l'olfaction sur nos comportements est parfois plus dissimulée, voire inconsciente.

Une façon d'étudier les phénomènes d'olfaction inconsciente consiste à examiner l'effet potentiel de l'odeur des larmes sur le comportement humain (*Figure 6*) (Agron *et al.*, 2023). Mais pour analyser l'influence des larmes émotionnelles, encore faut-il en récolter... ce qui n'est pas une tâche facile. Pour cela, nous avons demandé aux participants de l'étude quel film les faisait pleurer à coup sûr. Ils ont ensuite visionné ce film pendant que nous recueillions discrètement environ 160 ml de larmes sur leurs joues. Une fois ce précieux échantillon obtenu, la première question à se poser était la suivante : les larmes ont-elles une odeur ? Nous avons démontré que, d'un point de vue olfactif, elles ne se distinguent pas d'un simple sérum physiologique. Autrement dit, l'être humain n'est pas capable de percevoir consciemment l'odeur des larmes.

Nous nous sommes demandé si les larmes pouvaient jouer un rôle dans la communication entre individus, comme c'est déjà le cas chez de nombreux

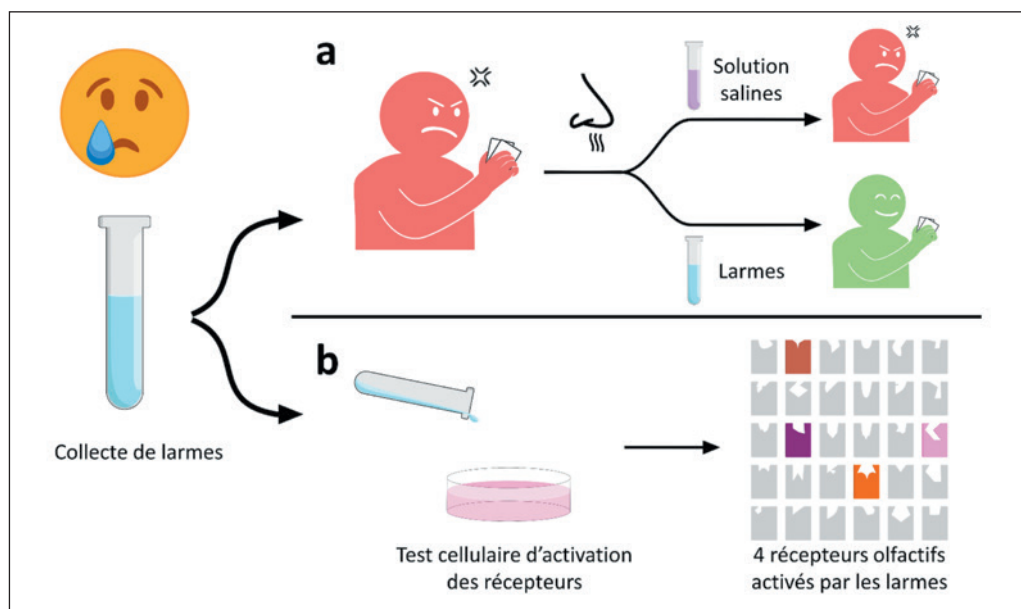


Figure 6

La communication par les larmes.

Des larmes ont été collectées sur des volontaires pour deux tests distincts (a et b).

a. *Lors d'une partie de jeu énervante, des participants devaient sentir soit des larmes (en bleu), soit une solution saline (en rose). Ceux qui sentaient les larmes étaient moins agressifs que ceux ayant senti la solution saline.*

b. *Des récepteurs olfactifs (RO) ont été exprimés dans des cellules, puis exposés à des larmes. Quatre de ces récepteurs ont été activés, montrant que les larmes sont capables d'activer notre système olfactif.*

mammifères. Pour explorer cette hypothèse, nous avons étudié l'effet potentiel des larmes sur le comportement agressif. Mais comment provoquer, et surtout mesurer, de l'agressivité chez un individu ? Une solution simple : utiliser un jeu particulièrement frustrant... comme une version numérique du Monopoly. Dans cette expérience, des participants masculins devaient jouer à un jeu de plateau conçu pour générer de la frustration. Ils étaient amenés à perdre artificiellement contre un adversaire, et avaient ensuite la possibilité de se « venger » en infligeant une punition gratuite, sans aucun bénéfice personnel.

Le degré de vengeance choisi par les participants permettait alors d'évaluer leur niveau d'agressivité. Pendant la partie, les participants devaient sentir, à l'aveugle, une solution. Certains respiraient des larmes émotionnelles, d'autres un simple sérum physiologique. Résultat : ceux qui avaient été exposés aux larmes étaient moins enclins à se venger.

Cette diminution de l'agressivité suggère que les larmes pourraient bel et bien jouer un rôle dans la communication non verbale, en influençant nos comportements de manière inconsciente. Pour aller plus loin, nous avons testé l'effet des larmes sur l'ensemble

des 400 récepteurs olfactifs humains. Quatre d'entre eux réagissent spécifiquement aux larmes, mais pas au sérum physiologique. Cette découverte suggère que, même en l'absence d'une odeur perçue consciemment, notre système olfactif est bel et bien capable de détecter des molécules présentes dans les larmes. Ce sont peut-être ces récepteurs particuliers qui permettent aux larmes d'agir comme un signal chimique silencieux, capable de moduler les comportements des individus qui nous entourent.

7 L'odorat à l'échelle de l'atome : où en est la science ?

Aujourd'hui, grâce à un intérêt grandissant pour les récepteurs olfactifs et à l'arrivée de nouvelles technologies, le domaine de l'olfaction fait de nombreuses avancées. Pendant longtemps, nous n'avions qu'une idée très approximative de la forme de ces récepteurs, notamment au niveau atomique. Ce qui nous manquait, c'était une vraie « photo » de ces protéines. Pour obtenir une image aussi précise, il faut utiliser un appareil capable de voir à l'échelle des atomes. C'est là qu'interviennent les microscopes électroniques, qui utilisent des électrons au lieu de la lumière pour détecter les objets, permettant ainsi une résolution beaucoup plus fine. Ce n'est que récemment que

nous avons réussi à déterminer la structure exacte d'un récepteur olfactif humain, appelé OR51E2 (Billesbølle *et al.*, 2023 ; de March *et al.*, 2024). En utilisant un microscope électronique, on observe ce récepteur lié à une molécule qui sent le fromage, l'acide propionique (**Figure 7**). Cette image est tellement précise qu'elle montre les atomes à une échelle d'un dixième de milliardième de mètre !

Cette avancée est très importante car elle nous aide à mieux comprendre comment fonctionnent ces récepteurs. Elle ouvre aussi la porte à de nombreuses recherches, notamment informatiques, où des modèles 3D précis servent à étudier le comportement des protéines et autres éléments biologiques difficiles à observer directement en laboratoire.

Par ailleurs, une autre révolution touche le monde de l'odorat : l'intelligence artificielle (IA). Si les humains ont du mal à prédire l'odeur d'une molécule en regardant seulement sa structure chimique, les IA, elles, y parviennent. En 2023, le premier modèle d'apprentissage automatique capable de prédire l'odeur d'une molécule a été mis au point (Lee *et al.*, 2023), et il est déjà utilisé par les industries. Cet outil est une vraie mine d'or pour les secteurs de la parfumerie et de l'agroalimentaire, qui peuvent ainsi imaginer de nouvelles senteurs.

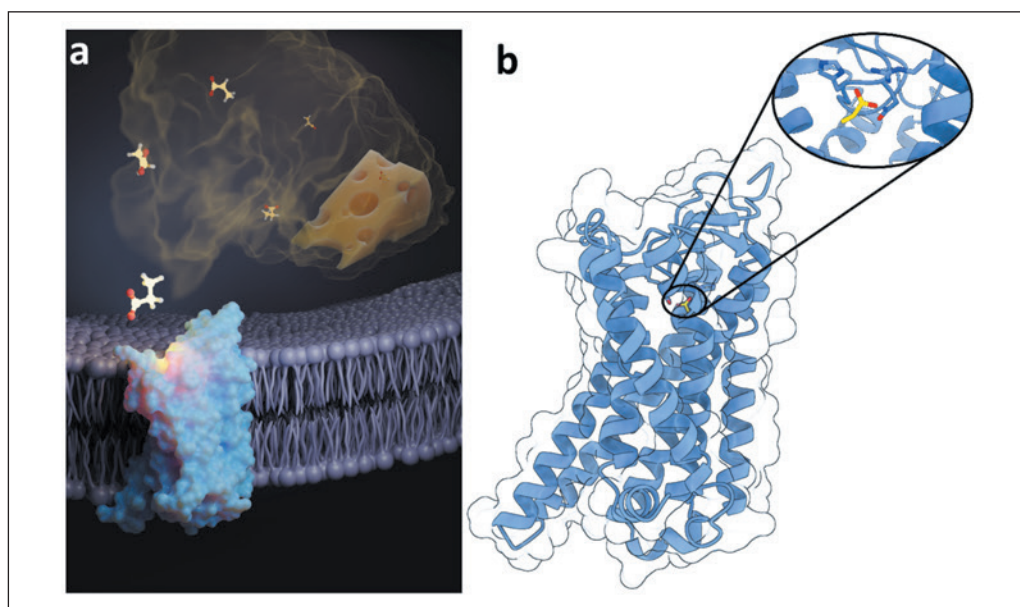


Figure 7

Les récepteurs olfactifs à l'échelle atomique.

a. Le récepteur olfactif OR51E2 (en bleu), situé dans la membrane cellulaire (en violet), détecte les molécules d'acide propionique (en jaune) provenant du fromage.

b. La structure de OR51E2 à l'échelle atomique, obtenue par cryomicroscopie électronique. Un zoom à l'intérieur du récepteur permet d'observer l'interaction entre atomes de l'acide propionique et de OR51E2.

Conclusion

Imaginons un futur olfactif

Il est désormais temps de laisser libre cours à notre imagination et d'envisager un futur où l'odorat occuperait une place centrale dans nos vies. Grâce aux progrès technologiques, comme l'intelligence artificielle et les modèles informatiques, la création culinaire pourrait être guidée par la prédiction des perceptions olfactives, sans même avoir besoin de cuisiner. Dans ce monde de demain, l'alimentation serait personnalisée non seulement en fonction de nos goûts, mais aussi en tenant compte de la sensibilité unique de nos récepteurs olfactifs, adaptés à notre profil génétique. Nos plats pourraient être subtilement modifiés : on renforcerait les

arômes que nous aimons, tout en atténuant, voire en supprimant, ceux qui nous déplaisent. Nous pourrions même partager l'odeur de nos créations culinaires avec notre entourage, bien au-delà du simple partage de photos, déjà si populaire aujourd'hui. Imaginez pouvoir sentir à distance le parfum d'un plat avant de choisir votre menu au restaurant !

Le développement des technologies liées à l'olfaction pourrait ainsi devenir un acteur clé de l'alimentation de demain, en nous offrant une maîtrise parfaite des arômes et une expérience sensorielle totalement réinventée.

Bibliographie

Agron S., de March C. A., Weissgross R., Mishor E., Gorodisky L., Weiss T., Furman-Haran E., Matsunam H., Sobel N., "A chemical signal in human female tears lowers aggression in males", *PLoS Biol*, 2023, vol. 21, n° 12, e3002442. DOI : 10.1371/journal.pbio.3002442 From NLM Medline.

Billesbølle C. B., de March C. A., van der Velden W. J. C., Ma N., Tewari J., del Torrent C. L., Li L., Faust B., Vaidehi N., Matsunami H., *et al.*, "Structural basis of odorant recognition by a human odorant receptor", *Nature*, 2023, vol. 615, n° 7953, pp. 742-749. DOI : 10.1038/s41586-023-05798-y.

Buck L., Axel R., "A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition", *Cell*, 1991, vol. 65, n° 1, pp. 175-187. DOI : 10.1016/0092-8674(91)90418-x From NLM Medline.

Bushdid C., Magnasco M. O., Vosshall L. B., Keller A., "Humans can discriminate more than 1 trillion olfactory stimuli", *Science*, 2014, vol. 343, n° 6177, pp. 1370-1372. DOI : 10.1126/science.1249168 From NLM Medline.

David O. R., "A chemical history of polycyclic musks", *Chemistry-A European Journal*, 2020, vol. 26, n° 34, pp. 7537-7555.

de March C. A., Ryu S., Sicard G., Moon C., Golebiowski J., "Structure-odour relationships reviewed in the postgenomic era", *Flavour and Fragrance Journal*, 2015, vol. 30, n° 5, pp. 342-361.

de March C. A., Ma N., Billesbølle C. B., Tewari J., Llinas Del Torrent C., van der Velden W. J. C., Ojiro I., Takayama I., Faust B., Li L., *et al.*, "Engineered odorant receptors illuminate the basis of odour discrimination", *Nature*, 2024, vol. 635, n° 8038, pp. 499-508. DOI : 10.1038/s41586-024-08126-0 From NLM Medline.

Eriksson N., Wu S., Do C. B., Kiefer A. K., Tung J. Y., Mountain J. L., Hind D. A., Francke U., "A genetic variant near olfactory receptor genes influences cilantro preference", *Flavour*, 2012, vol. 1, n° 1, p. 22.

Keller A., Zhuang H., Chi Q., Vosshall L. B., Matsunami H., "Genetic variation in a human odorant receptor alters odour perception", *Nature*, 2007, vol. 449, n° 7161, pp. 468-472.

DOI : 10.1038/nature06162 From NLM Medline.

Lee S.-J., Depoortere I., Hatt H., "Therapeutic potential of ectopic olfactory and taste receptors", *Nature Reviews Drug Discovery*, 2019, vol. 18, n° 2, pp. 116-138.

Lee B. K., Mayhew E. J., Sanchez-Lengeling B., Wei J. N., Qian W. W., Little K. A., Andres M., Nguyen B. B., Moloy T., Yasunik J., *et al.*, "A principal odor map unifies diverse tasks in olfactory perception", *Science*, 2023, vol. 381, n° 6661, pp. 999-1006. DOI : 10.1126/science.ade4401 From NLM Medline.

Malnic B., Hirono J., Sato T., Buck L., "Combinatorial receptor codes for odors", *Cell*, 1999, vol. 96, pp. 713-723.

Meister M., "On the dimensionality of odor space", *Elife*, 2015, vol. 4, e07865.

Parma V., Ohla K., Veldhuizen M. G., Niv M. Y., Kelly C. E., Bakke A. J., Cooper K. W., Bouysset C., Pirastu N., Dibattista M., "More than smell—COVID-19 is associated with severe impairment of smell, taste, and chemesthesis", *Chemical senses*, 2020, vol. 45, n° 7, pp. 609-622.

Patel R. M., Pinto, J. M., "Olfaction: anatomy, physiology, and disease", *Clinical anatomy*, 2014, vol. 27, n° 1, pp. 54-60.

Trimmer C., Keller A., Murphy N. R., Snyder L. L., Willer J. R., Nagai M., Katsanis N., Vosshall L. B., Matsunami H., Mainland J. D., "Genetic variation

across the human olfactory receptor repertoire alters odor perception", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, vol. 116, n° 19, pp. 9475-9480.

Xu L. L., Stackhouse B. G., Florence K., Zhang W., Shanmugam N., Sesterhenn I. A., Zou Z.,

Srikantan V., Augustus M., Roschke V., "PSGR, a novel prostate-specific gene with homology to a G protein-coupled receptor, is overexpressed in prostate cancer", *Cancer research*, 2000, vol. 60, n° 23, pp. 6568-6572.

Les métaux dans l'alimentation : un bienfait ou un danger ?

D'après la conférence de Bernard Meunier, spécialiste de l'oxydation douce depuis de nombreuses années. Il s'est ensuite spécialisé dans les produits pharmaceutiques, en particulier les anticancéreux et les « anti-maladies du sommeil ». Il a tout d'abord été chercheur au CNRS¹ (ce qu'il est toujours), puis au LCC² à Toulouse, et, en parallèle, enseignant à l'École polytechnique puis au Collège de France³. Bernard Meunier a ensuite été nommé président du CNRS. Élu à l'Académie des sciences en 1999, il en a été le président de 2015 à 2016. À l'heure actuelle, il est professeur à Canton, en Chine. Aujourd'hui, il va nous parler des métaux dans l'alimentation et de leurs effets sur la santé – un sujet un peu trop méconnu.

Introduction

Les peurs liées aux métaux dans l'alimentation

On entend beaucoup de propos inquiets autour de la présence de métaux dans l'alimentation : il y a 25-30 ans, une campagne a ainsi été lancée pour faire

disparaître les casseroles en aluminium des cuisines par crainte de voir la maladie d'Alzheimer se généraliser... ce qui n'était pas justifié. Résultat : on les a remplacées par les lourdes gamelles en acier inoxydable. Aluminium ou pas, il y a souvent des peurs irrationnelles comme celle-là !

1. Centre National de la Recherche Scientifique : principal organisme public français de recherche.

2. Laboratoire de Chimie de Coordination : centre du CNRS spécialisé en chimie.

3. Institution scientifique prestigieuse créée par François I^{er} à Paris en 1530.

L'alimentation est un bon domaine pour les voir naître et fleurir.

Il faut apprendre à « gérer ses peurs ». Saurons-nous inventer un organisme pour éviter ces peurs au moins chez les Européens ? Mais, avant tout, il est clair que la chimie des éléments métalliques dans le corps humain, leurs interactions avec leur environnement, leurs perturbations et leur rôle positif sont un passage obligé de la connaissance scientifique. L'état actuel des sciences chimique et biologique nous offre l'opportunité de multiples progrès et la pertinence des dispositions pratiques.

leur violette, un certain nombre d'éléments chimiques qui sont essentiels à la santé des humains. À partir de la gauche, on a l'hydrogène, le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium. Et puis, parmi les métaux, on note le manganèse, le fer, le cobalt, le cuivre, le zinc, etc. : des métaux qui interviennent d'habitude dans la sidérurgie⁴, mais qui sont essentiels pour d'autres fonctions !

Prenons le manganèse à titre d'exemple. Chez les plantes, on a de la chlorophylle⁵ mais, à côté, grâce à des associations avec des molécules

Panorama des métaux présents dans le corps humain

La **figure 1** montre le tableau périodique des éléments chimiques. Il indique, en cou-

4. Industrie de transformation des minerais en métaux.

5. Pigment vert des plantes, essentiel à la photosynthèse.

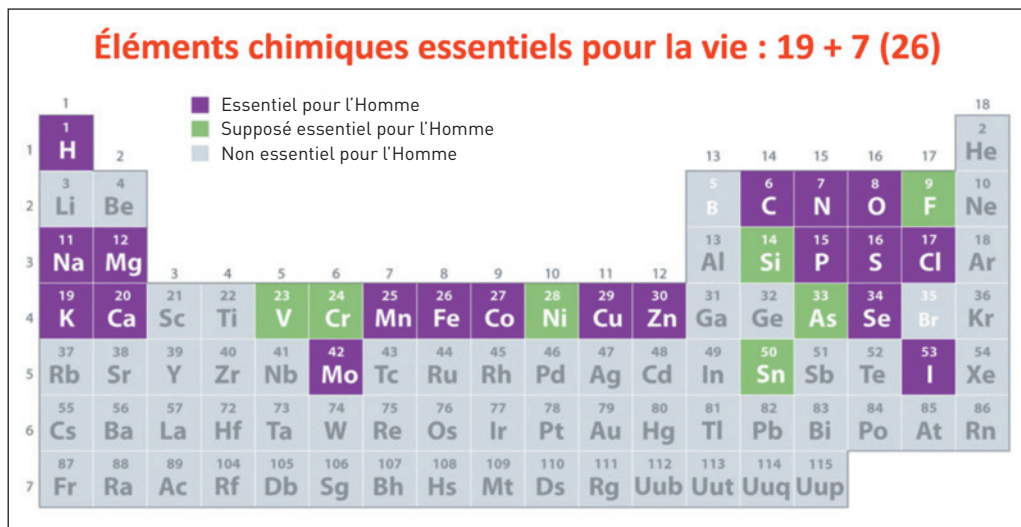


Figure 1

Tableau périodique des éléments indiquant les éléments essentiels pour l'homme, et d'autres qui sont supposés essentiels.

Source : Wikipédia.

spécifiques (des complexes⁶) présentes, se forme le photosystème II⁷. Cet assemblage qui contient des atomes de manganèse réagit avec l'eau pour synthétiser l'oxygène nécessaire à son existence. Voici un grand écart : de l'industrie sidérurgique à la biologie !

À côté des éléments essentiels pour la vie, il y a aussi des éléments dont on n'a pas besoin. On peut très bien vivre sans avoir de l'osmium, de l'uranium ou du platine (même si ce dernier est bien apprécié

comme constituant des pots catalytiques⁸ pour les automobiles, ce n'est pas vraiment la vie). De même, nous n'avons pas besoin du mercure pour l'alimentation... nous pouvons vivre sans. Cependant, si on n'a pas de fer, pas de cobalt, pas de cuivre et pas de zinc, alors on a des problèmes de santé et des carences alimentaires importantes, voire létales.

La **figure 2** liste les principaux éléments⁹ présents dans le corps humain, avec indication de leur importance en pourcentages. Les ions métalliques sont peu présents, de l'ordre de 1 % par exemple : ce sont des traces (on utilise aussi

6. Structure chimique polyatomique constituée d'une ou de plusieurs espèces indépendantes en interaction.

7. Complexe protéique dans les plantes qui capte la lumière pour transformer l'eau en oxygène et électrons.

8. Dispositifs des voitures qui transforment les gaz polluants en substances moins nocives.

9. Atome ou molécule ayant gagné ou perdu un ou plusieurs électrons.

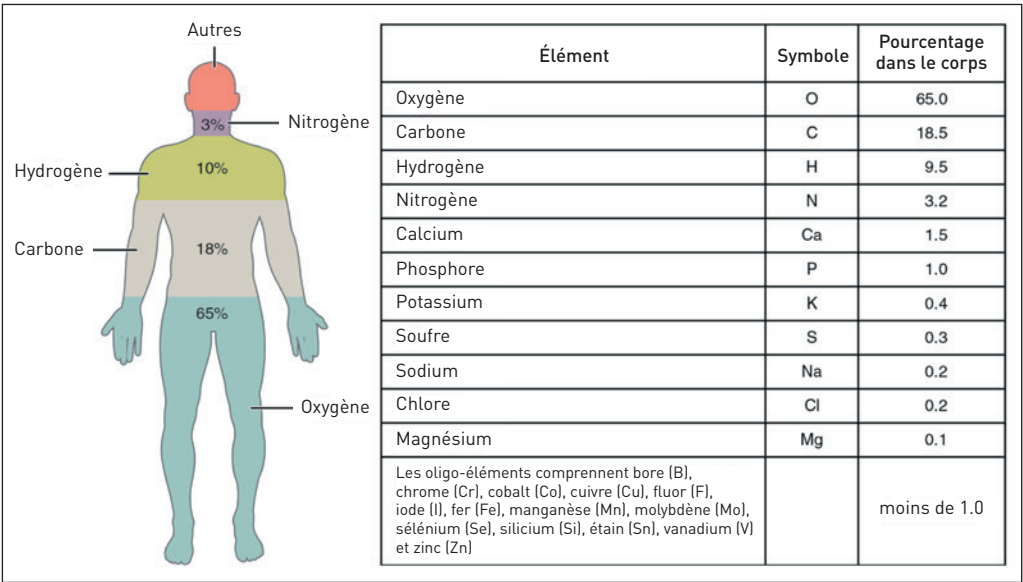


Figure 2
Les différents ions présents dans le corps humain.

le terme «oligoéléments¹⁰»). Cela ne représente donc pas grand-chose en masse dans le corps, mais ce sont des éléments essentiels... Regardons-les de plus près.

1 Quelques métaux essentiels

1.1. Le rôle du fer pour l'hémoglobine, les cytochromes et la catalase

L'hémoglobine est un transporteur d'oxygène qui déplace les ions oxygène d'un point à l'autre de l'organisme en fonction des demandes. Le cœur de la protéine-hémoglobine

est construit autour d'un «hème¹¹», qui est cette molécule plate, figurée en vert sur la **figure 3** qui la représente sur le schéma d'un cytochrome P450. Au centre de l'hème se trouve un ion fer (II) sur lequel se lie l'oxygène qui sera transporté vers les muscles où il est pris en charge par un autre récepteur de l'oxygène, la myoglobine, qui a une structure voisine de l'hémoglobine et qui distribue l'oxygène sur les sites d'utilisation.

L'hème, l'hémoglobine et donc le fer sont, par conséquent, au cœur du système de transport d'oxygène et permettent la vie.

10. Élément chimique nécessaire à la vie en très faible quantité.

En modifiant la protéine autour de l'hème, on obtient d'autres fonctions biologiques. C'est l'exemple du cytochrome P450 (**Figure 3**). Cette enzyme¹² n'effectue pas le transport d'oxygène, mais elle est capable d'utiliser l'oxygène moléculaire en tant que source d'atome d'oxygène pour l'hydroxylation de substrats très variés. Cela consiste en l'insertion d'un atome d'oxygène dans une liaison carbone-hydrogène, ce qui permet la transformation, par métabolisation¹³, des produits exogènes¹⁴ que l'on respire ou consomme, ou encore effectuer la

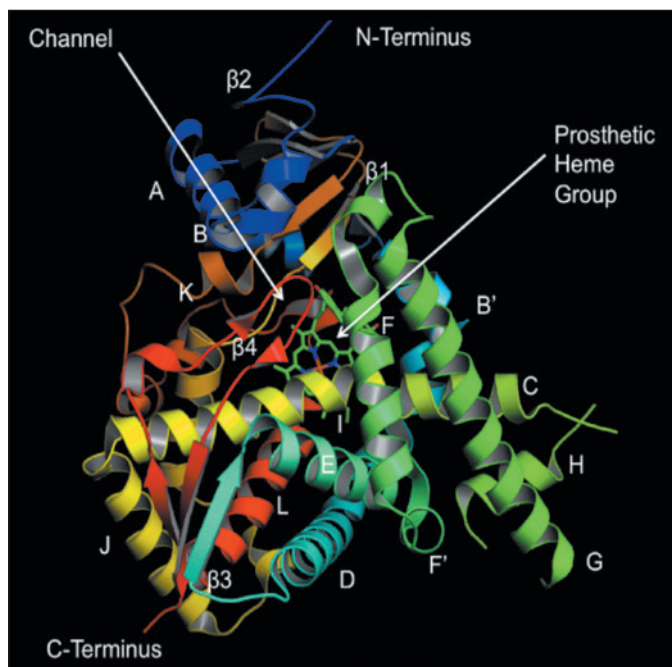


Figure 3

Structure d'un cytochrome P450.

Source : Wikipédia.

11. Groupe chimique contenant un atome de fer, présent dans l'hémoglobine et certaines enzymes.

12. Protéine qui accélère une réaction chimique dans l'organisme.

13. Transformation des substances (comme les médicaments) par le corps.

14. Qui vient de l'extérieur du corps.

biosynthèse¹⁵ d'hormones¹⁶ ou d'autres produits essentiels dans le métabolisme de la vie quotidienne. Il y a par exemple des cytochromes P450 spécialisés dans la synthèse et la modification des corticoïdes¹⁷, etc.

On peut également citer les peroxydases¹⁸, qui possèdent le même motif hémique mais qui sont utilisées non pas pour l'hydroxylation, mais, en simplifiant, pour de l'oxydation à deux électrons¹⁹. On en observe chez les humains et chez les végétaux. La plus « célèbre », c'est la *horseradish peroxidase*²⁰, la peroxydase du raifort (**Figure 4**) [pour ceux qui aiment la cuisine japonaise, c'est recommandé].

On peut aussi citer la catalase²¹, qui présente elle aussi un hème dans sa structure. Mais, cette fois, en changeant l'environnement protéique²² autour du site actif, on provoque une dismutation²³ des molécules d'eau oxygénée.

15. Processus de fabrication de molécules biologiques par l'organisme.

16. Messagers chimiques produits par le corps pour réguler ses fonctions.

17. Hormones (ou médicaments) qui réduisent l'inflammation.

18. Enzyme qui utilise le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée) pour oxyder d'autres molécules.

19. Réaction chimique où une molécule perd deux électrons.

20. Peroxydase extraite du raifort, utilisée en laboratoire.

21. Enzyme qui décompose l'eau oxygénée (H_2O_2) en eau et en oxygène.

22. Ensemble des atomes ou groupes chimiques entourant un site actif dans une protéine.

23. Réaction où une molécule de H_2O_2 est à la fois oxydée et réduite en eau et en oxygène.

Pourquoi cette réaction est-elle nécessaire ? Elle a un rôle de détoxification, qui permet d'éviter de conserver l'eau oxygénée lorsqu'il s'en est formé. Elle dismute l'eau oxygénée en reformant de l'oxygène moléculaire et de l'eau.

Cette réaction nous évite d'avoir une concentration excessive d'eau oxygénée qui signifierait un manque d'oxygène, et donc d'énergie. Il faut en effet assurer la pérennité de systèmes où coexistent oxydant et réducteur²⁴. Par une réduction directe de l'oxygène moléculaire à un électron, vous faites l'anion superoxyde²⁵ ; à deux électrons, vous obtenez l'eau oxygénée. Mais le troisième électron, lui, est terrible : en arrivant dans la liaison antiliante oxygène-oxygène²⁶, vous coupez cette liaison

24. Un oxydant capte des électrons, un réducteur en donne.

25. O_2^- , forme d'oxygène très réactive pouvant endommager les cellules.

26. Orbitales qui affaiblissent la liaison entre deux atomes d'oxygène.

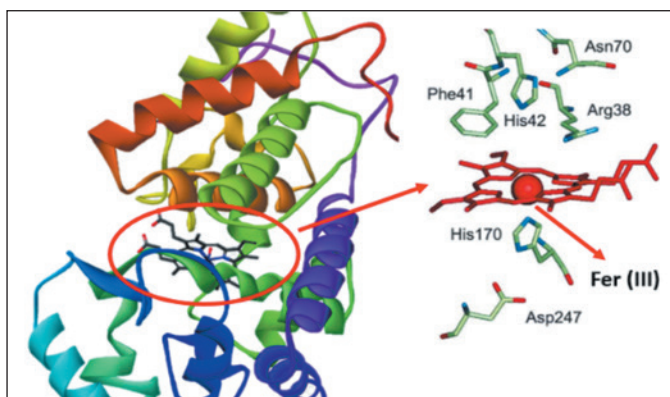


Figure 4

Structure de la peroxydase du raifort.

Source : Wikipédia.

oxygène-oxygène, et vous formez des radicaux hydroxyles²⁷.

Les radicaux libres²⁸, ce sont les fameuses espèces réactives de l'oxygène. Contre ceux-ci, nous n'avons pas de système de détoxification ou de contrôle. On met des pommades partout pour éviter les radicaux libres sur la peau, et ce genre de chose. En fait, c'est au niveau de la cascade de réduction de l'oxygène moléculaire que le contrôle s'effectue grâce à des enzymes, **des superoxydes dismutases²⁹ et des catalases** qui sont capables d'accomplir cette tâche avec une rapidité et une efficacité exceptionnelles.

Cet exemple du fer, avec un ligand³⁰ autour du fer, et des protéines autour de ce ligand, illustre la diversité des réactions rendues possibles par la présence du fer. Mais ce n'est qu'un exemple, le premier que nous rencontrons du monde des métalloenzymes³¹. Comme leur nom l'indique, celles-ci sont des enzymes, donc des catalyseurs ; elles ont de gros effets chimiques à très faibles quantités. Pour la *horseradish peroxidase*, vous avez besoin de quelques nanogrammes pour faire des

transformations très importantes de produits : ce sont donc des catalyseurs très actifs. **On n'a pas besoin de grosses quantités d'ions métalliques à activité redox³² dans les systèmes vivants, mais ils sont essentiels.**

1.2. Le cobalt et la vitamine B12

Un autre élément métallique important est le cobalt parce qu'il est au cœur des sites actifs de la vitamine B12 (**Figure 5**). Chaque fois que l'organisme a besoin d'une réaction radicalaire³³, ou d'arracher un méthyle³⁴, c'est la vitamine B12 qui intervient, grâce à l'existence d'une liaison cobalt-alkyle³⁵, qui est fragile et qui permet la formation de radicaux. On n'a pas besoin de beaucoup de cobalt, mais on en a besoin : c'est toujours une question de dose. Si l'on n'a pas de vitamine B12, c'est une carence grave. On a besoin d'une dose quotidienne de l'ordre du microgramme (10^{-6} g). Pas le kilo, pas le gramme, pas le millième de gramme, mais le millième de millième de gramme. C'est une infime quantité, mais elle est essentielle : elle évite les problèmes d'anémie³⁶.

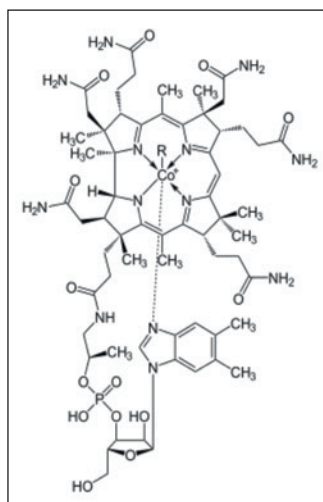


Figure 5

Structure de la vitamine B12.

Source : Wikipédia.

27. Espèces très réactives ($\bullet\text{OH}$) pouvant endommager l'ADN ou les protéines.

28. Molécules instables ayant un électron non apparié.

29. Enzymes qui transforment les radicaux superoxydes en eau oxygénée.

30. Molécule ou ion qui se lie à un métal dans une enzyme.

31. Enzymes contenant un ou plusieurs ions métalliques.

32. Capacité à participer à des réactions d'oxydation-réduction.

33. Réaction impliquant des radicaux libres.

34. Groupe chimique- CH_3 .

35. Groupe d'atomes de carbone et d'hydrogène dérivé d'un alcane (ex. : méthyle, éthyle...).

36. Manque de globules rouges ou d'hémoglobine, causant fatigue et faiblesse.

Dans les régimes strictement végétaliens³⁷, où il n'y a pas de cobalt, on a recours à des compléments alimentaires qu'ils trouvent dans les pharmacies.

1.3. Manganèse et autres métaux essentiels

Nous n'allons pas retracer de façon encyclopédique les activités de tous les métaux que l'on trouve dans la vie. Mais arrêtons-nous tout de même sur le manganèse, en raison de son effet pour la réduction du CO₂; on conçoit les perspectives que cela lui ouvre dans le monde végétal car le gaz carbonique est la principale source de carbone à disposition des plantes.

Grâce aux réactions catalytiques opérées par le manganèse, la chimie permet aux plantes de réduire le CO₂ pour disposer d'eau d'une part et de carbone de l'autre. Grâce à cette chimie, les végétaux sont capables de faire la synthèse de toutes les molécules qui leur sont essentielles : **le cœur du système de transformation du CO₂ en carbone et en eau, c'est le manganèse.** Il y a ainsi du manganèse dans les feuilles et, à l'automne, quand les feuilles tombent, il y a du manganèse sur le sol. Et le métabolisme continue : l'humidité des sols permet la croissance des champignons et toute la chimie des sols qui va avec, et qui, de nouveau, utilise la catalyse par le manganèse.

Pour toute cette chimie végétale qui n'est pas directement

celle du corps humain, le manganèse est un métal essentiel.

On se contentera ici de retenir cette conclusion, en évitant d'explicitier les mécanismes des réactions de ces enzymes, descriptions des entités métal-oxo³⁸, des hauts degrés d'oxydation³⁹, comme le fer(III) pour l'hémoglobine, le fer(III)... On arrive aussi dans le site catalytique⁴⁰ de certaines enzymes à observer des espèces du fer(IV) voire du fer(V)-oxo... degrés d'oxydation extrêmement divers nécessaires aux réactions catalysées par ces métalloenzymes.

1.4. Quels besoins en ions métalliques ?

Pour comprendre le rôle des métaux pour les organismes vivants et, bien entendu, les recommandations sur les doses à considérer comme nécessaires ou les doses toxiques, il est important d'avoir une idée des quantités dont il s'agit.

A-t-on besoin de beaucoup de fer ? Chez un adulte moyen, il y a entre 2 et 4 g de fer. On ne rouille pas beaucoup ! Le besoin quotidien est tout de même entre 7 et 10 mg par jour. Pour les femmes, avec les règles, il y a une perte de sang, il faut donc éviter les carences en fer. Pour les régimes strictement végétariens, cela peut parfois poser des problèmes.

38. Espèces chimiques formées d'un métal lié à un atome d'oxygène.

39. État où un atome a perdu plusieurs électrons.

40. Zone active d'une enzyme où a lieu la réaction.

37. Régime alimentaire des personnes ne consommant aucun produit d'origine animale.

Concernant le magnésium, chez l'adulte, on en stocke entre 20 et 25 g avec un apport quotidien entre 300 et 400 mg par jour. C'est important, parce que le magnésium intervient dans la régulation et dans la métabolisation du potassium. Le cuivre, c'est 75 à 100 mg : très peu, mais on en a besoin. Pourquoi ? Parce qu'on a des enzymes à cuivre. Je vous ai parlé d'une enzyme de détoxification de l'anion superoxyde, qui est le produit de la réduction mono-électronique⁴¹ de l'oxygène moléculaire. Cette enzyme s'appelle l'enzyme cuivre-zinc et, dans son site actif, il y a du cuivre et du zinc qui dissout très rapidement l'anion superoxyde. On trouve aussi du cuivre dans la cytochrome C oxydase⁴², de même que dans la tyrosinase, l'enzyme qui fabrique la tyrosine⁴³. L'apport quotidien en cuivre, c'est 1 à 2 mg par jour : pas grand-chose, mais indispensable.

On a besoin de ces ions métalliques, mais comment se régulent leurs concentrations ? C'est évidemment une question clé à examiner dès qu'on pense à la santé.

2 D'autres métaux toxiques

2.1. Le mercure

Il existe aussi des ions métalliques dont on n'a vraiment

pas besoin ; ce sont des poisons pour le corps. Le cas du mercure est particulièrement intéressant sous ce rapport – et spécialement depuis la terrible catastrophe dite « de Minamata », du nom d'une petite ville de pêcheurs du Japon. Les pêcheurs de la baie voyaient bien que les poissons de leur pêche présentaient des modifications morphologiques importantes. Ces poissons malformés ne pouvaient pas être vendus, ils n'étaient pas utilisables sur le marché. Alors, les pêcheurs utilisaient ces poissons « empoisonnés au mercure » dans leur alimentation familiale.

Au début, on ne comprenait rien à cette situation couplée à l'observation de malformations chez les nouveau-nés chez les familles de pêcheurs. Peu à peu, on a compris que ces dommages étaient liés à l'exploitation de l'usine chimique installée près du village dans les années 1950-1960, usine chimique qui rejetait un catalyseur à base de mercure. Tous les résidus passaient dans la mer, et on a compris que c'était la cause des dommages subis par les poissons : ils étaient endommagés par le mercure de ces résidus.

Les sels de mercure rejetés par l'usine chimique étaient transformés par des micro-organismes marins en méthylmercure⁴⁴, un alkylant⁴⁵ terrible, qui modifie les

41. Réduction impliquant le gain d'un seul électron.

42. Enzyme clé de la respiration cellulaire utilisant de l'oxygène.

43. Acide aminé, précurseur de la dopamine (hormone du plaisir) et de la mélanine (responsable du bronzage).

44. Forme organique très toxique du mercure, qui s'accumule dans les poissons.

45. Composé chimique pouvant modifier l'ADN, souvent cancérigène.

protéines ainsi que les acides nucléiques⁴⁶ : c'est la maladie de Minamata.

En étudiant cela, on a compris tout le processus biologique impliqué dans la transformation d'un certain sel de mercure, que l'on croyait inoffensif, en un produit hautement toxique. Cela a conduit à une législation et, désormais, on impose des contrôles sur les teneurs en mercure dans les aliments et autres.

Mais la pollution par le mercure, on en entend encore parler même en dehors de la pêche. C'est que les orpailleurs⁴⁷ clandestins utilisent du mercure. Pour récupérer des traces d'or, ils utilisent un peu de mercure pour former un amalgame⁴⁸ or-mercure que l'on chauffe à l'air libre pour évaporer le mercure et récupérer l'or. Les orpailleurs clandestins s'empoisonnent ainsi et empoisonnent l'atmosphère. Il existe aujourd'hui des techniques d'extraction de l'or qui sont tout de même correctes. Mais dans l'extraction d'or clandestine, cette pratique a encore cours et constitue une source de pollution importante.

Ce mercure-là a toujours sa nocivité : il passe dans l'eau, dans les océans, et on peut effectivement en retrouver, encore une fois, dans les poissons. Vous entendrez toujours

cette mise en garde : attention, ne mangez pas deux tonnes de poisson par jour, car vous risquez d'absorber trop de mercure. Heureusement, les seuils de mercure dans le thon sont tels qu'on peut encore consommer 50 ou 100 g de thon sans que cela pose de problème.

En fait, **les métaux lourds ne sont pas régulés dans notre organisme**, et ils peuvent, comme dans le cas du méthylmercure, être à l'origine d'une toxicité importante. Notre organisme est équipé pour réguler les ions métalliques dont il a besoin car il dispose de protéines qui assurent leur transport, leur extraction ou leur insertion dans les systèmes enzymatiques⁴⁹, mais il l'est beaucoup moins pour ceux dont nous n'avons pas besoin.

2.2. Épisodes de la gestion du plomb, métal toxique non essentiel

Les Romains fabriquaient des tuyauteries en plomb pour l'alimentation en eau, et certains historiens émettent l'hypothèse que le saturnisme⁵⁰ aurait contribué à la chute de l'Empire romain. Il est certain que cela a pu jouer un rôle car utiliser une distribution d'eau potable avec du plomb, ce n'est pas idéal.

Il n'est pas non plus souhaitable d'utiliser des peintures contenant du plomb. Le minium, par exemple, un pigment rouge

46. Molécules comme l'ADN et l'ARN, support de l'information génétique.

47. Personne qui cherche de l'or, souvent avec du mercure pour amalgamer l'or.

48. Alliage, souvent de mercure avec un autre métal.

49. Ensemble d'enzymes agissant en coopération dans une voie métabolique.

50. Intoxication au plomb, touchant surtout les enfants.

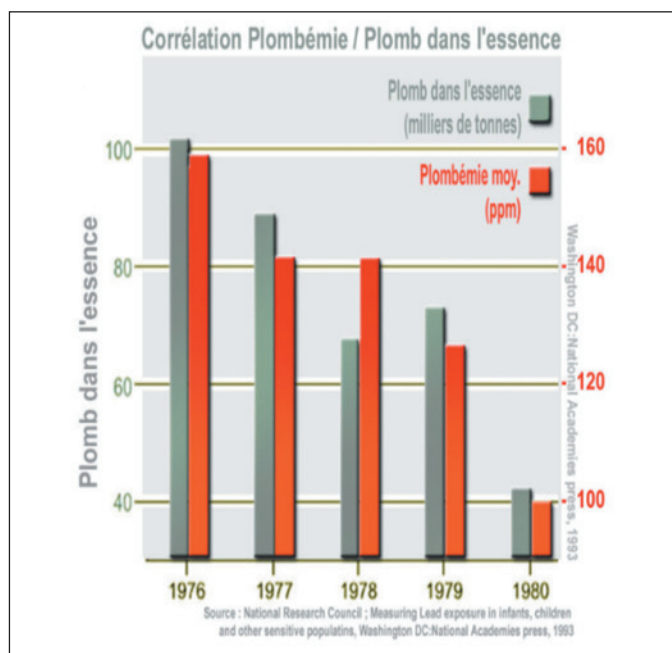


Figure 6

Corrélation de la teneur en plomb dans l'essence et dans le sang aux États-Unis.

Source : Wikipédia.

contenant du plomb, était autrefois très utilisé comme antirouille. Aujourd'hui, on n'en trouve plus, c'est terminé.

Par ailleurs, il est à la fois intéressant et inquiétant de se souvenir qu'au xx^e siècle encore, pour augmenter l'indice d'octane⁵¹ et éviter la détonation prématurée de l'essence dans les moteurs à explosion, on utilisait le plomb tétraéthyle. Cela a d'abord été développé aux États-Unis, puis utilisé en Europe. On retrouvait alors des quantités importantes de plomb le long des routes... et dans le sang des automobilistes (Figure 6).

51. Mesure de la résistance d'un carburant à l'auto-allumage.

Des chercheurs se sont amusés à analyser les productions des vignobles de Châteauneuf-du-Pape⁵², notamment ceux situés près de la route nationale qui traverse cette région viticole. En comparant les millésimes, ils ont dosé le plomb. Dans les anciens millésimes, on trouve du plomb; dans les plus récents, il y en a beaucoup moins. Cela s'explique par l'abandon progressif du plomb tétraéthyle⁵³, qu'ont permis de nouvelles méthodes de raffinage et un changement de la manière dont on augmentait l'indice d'octane. Si l'on regarde l'évolution du plomb dans l'essence, aux alentours de 1976, aux États-Unis, les quantités utilisées atteignaient plusieurs milliers de tonnes. En 1977, cela avait déjà nettement diminué. En 1980, la tendance se poursuivait à la baisse. Et si l'on mesure le taux de plomb dans le sang, en ppm, on observe que ce taux suit la même diminution. Cela accompagne la disparition progressive du plomb dans l'essence (Figure 6). Aujourd'hui, il n'y a plus que de l'essence sans plomb, ce qui est une très bonne chose, et l'on retrouve beaucoup moins de plomb le long des routes.

3 La régulation des ions métalliques par la biologie du corps

3.1. Cuivre et maladie de Wilson

Revenons à la régulation des concentrations des ions métalliques chez les humains.

52. Région viticole en vallée du Rhône méridionale.

53. Additif toxique utilisé autrefois dans l'essence.

Comme je vous l'ai expliqué plus haut, nous avons des protéines qui en sont responsables. Il s'agit de protéines dites « chaperonnes » qui accompagnent les ions métalliques jusqu'à l'endroit où ils doivent se rendre.

La régulation du cuivre dans l'organisme humain repose sur deux protéines essentielles au niveau du foie. Lorsque vous absorbez du cuivre dans votre alimentation, au-delà de la dose quotidienne nécessaire, que devient l'excès ? Il reste un moment dans le sang, puis repasse par le foie. C'est là qu'intervient une protéine, l'ATPase7B (**Figure 7**), qui va transporter ce cuivre et l'éliminer par l'intermédiaire de la bile⁵⁴, dans l'intestin et dans les selles.

Le système fonctionne très bien. Mais lorsque cette protéine est en dérangement, à cause d'une mutation génétique, cela provoque une maladie orpheline, la maladie de Wilson, du nom du médecin qui l'a décrite pour la première fois. Environ une personne sur 30 000 est porteuse de mutations sur cette protéine ATPase7B.

Une autre protéine est, elle, chargée de récupérer le cuivre pour l'incorporer dans les métalloenzymes à cuivre. Il y a donc deux voies : l'une pour éliminer l'excès, l'autre pour gérer la dose quotidienne dont nous avons besoin. Lorsque cette protéine est affectée de mutations, elle n'est plus

capable de capter correctement le cuivre, ni de l'exporter par la céruloplasmine⁵⁵ puis par la bile. Résultat : du cuivre en excès circule dans le sang. Ce cuivre libre ne va pas au bon endroit, il ne peut pas être utilisé. Or, nous n'avons besoin que de la juste quantité de cuivre, celle nécessaire au fonctionnement de nos enzymes. Ce déséquilibre crée des troubles complexes.

Je ne vais pas entrer dans les détails de la symptomatologie⁵⁶ de la maladie de Wilson, mais ce qu'il faut comprendre, c'est que ces ions cuivre(II), lorsqu'ils sont fixés sur des protéines inappropriées, peuvent être facilement réduits par des donneurs d'électrons endogènes⁵⁷ tels que le glutathion⁵⁸ ou le NADPH⁵⁹. Ainsi, le cuivre(II) devient cuivre(I), et le cuivre(I) est un excellent donneur d'électrons pour l'oxygène moléculaire. Cela conduit à la formation d'espèces réduites de l'oxygène à des endroits où elles ne devraient pas apparaître. Il existe bien des systèmes de détoxification, mais, en cas de production excessive, ils se trouvent débordés. C'est alors que les troubles apparaissent, et les pathologies se déclarent.



Figure 7

Protéine ATPase7B.

Source : Wikipédia.

54. Liquide digestif produit par le foie, utile pour digérer les graisses.

55. Protéine transportant le cuivre dans le sang.

56. Ensemble des symptômes observés chez un patient.

57. Molécule produite par le corps qui donne des électrons.

58. Antioxydant majeur des cellules.

59. Molécule fournissant des électrons dans les réactions de biosynthèse ou de défense antioxydante.

Voilà les enjeux liés à la maladie de Wilson. Il existe une autre ATPase, l'ATPase7A. C'est celle qui permet de récupérer le cuivre et de l'acheminer, *via* une série de protéines de transport du cuivre, vers les métalloenzymes qui en ont besoin. Lorsqu'il existe des mutations sur cette protéine, cela donne lieu à une autre maladie orpheline : la maladie de Menkes, qui touche environ un enfant sur 100 000.

3.2. Traitement actuel de la maladie de Wilson

Tant que tout fonctionne normalement, on n'entend jamais parler du cuivre. Mais lorsque surviennent ces maladies orphelines, il faut trouver des solutions. Pour la maladie de Wilson, justement, plusieurs traitements ont été développés au cours des trente dernières années, reposant sur l'utilisation de chélateurs du cuivre. Actuellement, deux chélateurs sont utilisés en clinique : la D-pénicillamine et la trientine, ou triéthylènetétramine, dont les formules chimiques sont reproduites sur la **figure 8**. Ce sont les deux chélateurs administrés à des doses assez importantes chez les patients atteints de la maladie de Wilson. On parle ici de un à plus de 3 g par jour environ. Ces doses élevées ne sont pas sans conséquence : plus la quantité administrée est importante, plus le risque d'effets secondaires augmente. Ces chélateurs deviennent par ailleurs moins efficaces avec le temps. Une partie de l'excès de cuivre parvient malgré tout à atteindre le cerveau, où il peut provoquer des troubles

neurologiques rappelant certains aspects de la maladie d'Alzheimer.

3.3. Recherches de M. Meunier : traitement de la maladie de Wilson

Permettez-moi d'évoquer brièvement ma recherche actuelle, que je mène en partie en Chine. Depuis ma retraite, je bénéficie d'un financement chinois pour mener des travaux de recherche très intéressants. Ce soutien est généreux, d'autant plus qu'on ne m'a pas demandé de produire des dossiers scientifiques de plusieurs dizaines de pages. Mon premier projet tenait en deux pages : je proposais de travailler sur la maladie d'Alzheimer et sur la maladie de Wilson. Et, depuis 2012, avec ce simple projet, j'ai pu poursuivre mes recherches, publier une trentaine d'articles et déposer quatre brevets.

Nous développons en particulier des chélateurs très spécifiques du cuivre, qui ne perturbent pas le zinc. C'est un point essentiel, car le zinc intervient dans l'allostérie⁶⁰ de nombreuses protéines et dans divers mécanismes de régulation. Il est impératif de ne pas y toucher. Le cerveau, en particulier, en contient une quantité significative : nos neurones en utilisent constamment.

Malheureusement, certains chélateurs actuels interfèrent tout de même avec le zinc, et nous cherchons à améliorer

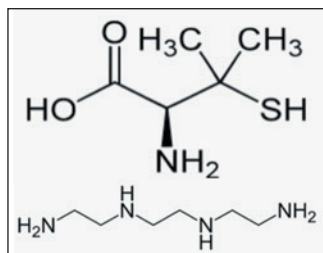


Figure 8

D-pénicillamine (en haut)
et trientine (en bas).

⁶⁰. Régulation d'une enzyme par fixation d'une molécule en un point autre que le site actif.

encore la sélectivité. Nous avons ainsi mis au point un chélateur capable de réduire la concentration de cuivre chez la souris, dans un modèle expérimental de la maladie de Wilson. Cette diminution est dose-dépendante, ce qui est fondamental en pharmacologie : l'effet du médicament doit être corrélé à sa dose. En parallèle, ce traitement augmente l'excrétion fécale du cuivre chez la souris, ce qui reflète un fonctionnement normal de l'élimination chez un individu sain.

Autre point important : nous parvenons également à restaurer la production de céruloplasmine. Je ne vais pas

entrer dans les détails, mais les médecins spécialisés dans la maladie de Wilson rêvent de pouvoir obtenir une telle restauration chez leurs patients. En effet, sans cuivre, la céruloplasmine ne se stabilise pas dans le foie ; sa durée de vie y est très courte. Cette molécule agit en tant que co-transporteur du cuivre et son activité est déterminante.

Par ailleurs, ce chélateur présente l'avantage d'être actif par voie orale, avec une excellente biodisponibilité⁶¹, ce qui est crucial.

61. Fraction d'un composé absorbée et utilisable par l'organisme.

Conclusion

Ce parcours à travers la présence et le rôle des éléments métalliques dans le corps humain conduit à des conclusions positives. Il insiste sur le fait que le corps humain a besoin d'ions métalliques et qu'une alimentation équilibrée est essentielle pour les fournir, mais aussi **qu'il est inutile de s'inquiéter outre mesure : de nombreux mécanismes de régulation sont à l'œuvre pour éviter les déséquilibres.**

Sans insister ici, il existe, à côté de la nature de l'alimentation, une autre source de trouble à prendre en compte : c'est l'**anxiété chronique vis-à-vis de cette alimentation**, problème que l'actualité a conduit à se développer. Manger constamment dans l'inquiétude complique la digestion, alors qu'il faut au contraire manger dans un état d'esprit serein.

Concernant les maladies comme Alzheimer, le cuivre est parfois mentionné, mais ce sont

surtout des dérèglements de l'homéostasie qui sont en cause. L'homéostasie désigne la capacité du corps à maintenir un équilibre – par exemple, une température stable autour de 37,2 °C ou 37,3 °C, ou une pression artérielle régulée.

Le cerveau contient différents ions métalliques, notamment du cuivre et du fer. Leur présence est nécessaire, mais elle est régulée. Toutefois, en vieillissant, nos protéines commencent à être glyquées⁶² et à fonctionner moins efficacement. On mesure d'ailleurs l'hémoglobine glyquée pour détecter un éventuel diabète de type 2 : cette forme d'hémoglobine transporte moins bien l'oxygène que sa version non glyquée. La dérégulation de l'homéostasie des ions métalliques constitue donc un problème réel. Dans le cerveau, cela pourrait être l'une des causes des maladies neurodégénératives⁶³. Les spécialistes de la maladie d'Alzheimer explorent en permanence de nouvelles hypothèses, qu'ils vérifient avec rigueur.

Je voudrais conclure sur une **note résolument positive**. Nous vivons une époque marquée par de nombreuses inquiétudes – concernant l'alimentation, la pollution, la santé... Nous sommes dans une période anxiogène : il suffit d'ouvrir un journal ou d'allumer la radio pour se retrouver envahi de messages alarmants. **Pourtant, il faut garder en tête que notre espérance de vie a considérablement augmenté.** En 1947-1948, l'espérance de vie des hommes en France était de 63 ans. L'âge de la retraite était fixé à 65 ans... Autrement dit, la question du financement des retraites ne se posait pas vraiment.

62. Protéines ayant réagi avec du sucre.

63. Maladie liée à la destruction progressive des neurones (ex. : Alzheimer, Parkinson).

Aujourd'hui, l'espérance de vie des hommes est de 79 ans, celle des femmes dépasse 83 ans. Et pour ceux qui ont l'impression que la vie à Paris est un calvaire, sachez que l'espérance de vie la plus élevée en France se trouve justement à Paris et dans ses départements périphériques. À l'inverse, c'est dans des départements ruraux comme la Creuse ou la Haute-Marne que l'on enregistre les espérances de vie les plus faibles. Ce serait d'ailleurs le sujet d'une autre conférence... Au-delà de la longévité, le nombre d'années vécues en bonne santé continue également à progresser. **Alors, respirons. Et n'oublions pas que, malgré tout, les choses vont dans le bon sens.**

Partie 3

L'industrie alimentaire
ne cesse de progresser

La compréhension moléculaire au service d'une alimentation innovante

Christian Campargue est biochimiste, directeur des sciences analytiques au centre de recherche de Danone.

1 Introduction

Un peu d'histoire : la science au cœur de Danone

Début xx^e siècle, des centaines de milliers d'Espagnols souffrent de problèmes digestifs, dus en partie à la malnutrition. Immigrant grec vivant à Barcelone, Isaac Carasso (**Figure 1**) est marqué par la situation des enfants. Il se penche alors sur les travaux d'Élie Metchnikoff, lauréat du prix Nobel considéré par beaucoup comme le père de l'immunité naturelle. Cet intérêt pour les recherches de Metchnikoff conduit Carasso à défendre les bienfaits du yaourt pour la santé. Il voit dans ce

produit laitier fermenté traditionnel des Balkans une solution possible aux problèmes



Figure 1

Photo d'Isaac Carasso, fondateur de Danone, et ses premiers yaourts.

nutritionnels généralisés de son pays d'adoption.

Appliquant les connaissances de pointe de l'Institut Pasteur à son yaourt, Carasso entame un parcours d'étude, de maîtrise et d'amélioration du yaourt, avec pour objectif de lutter contre la malnutrition des enfants espagnols.

Il baptise son entreprise Danone, en l'honneur de son fils Daniel, qui poursuivra plus tard sa mission. En 1919, Isaac vend d'abord son yaourt dans les pharmacies, en tant que médicament. Celui-ci acquiert rapidement une réputation de qualité et de bienfaits pour la santé, ce qui contribue à faire de Danone une marque de confiance en Espagne et ouvre la voie à son expansion. En ouvrant un premier magasin à Paris en 1929, Daniel Carasso étend ses activités à la France. Danone continue à mettre

l'accent sur les bienfaits du yaourt pour la santé, tout en accordant une attention croissante au goût, pour rendre ses produits aussi agréables à consommer qu'ils sont sains.

La science et la recherche chez Danone ont donc commencé par le yaourt, les ferments et la santé intestinale, et particulièrement les biotiques. En 2007, l'acquisition de Royal Numico, qui apporte une expertise inégalée dans le domaine de la santé, fondée sur plus de 100 ans de recherche en nutrition infantile et médicale, achève la transformation de Danone en une entreprise axée sur la santé par l'alimentation, avec un portefeuille couvrant toutes les étapes de la vie.

Elle s'étendra à des problématiques extrêmement variées comme l'immunité, l'allergie, la compréhension du lait maternel, mais aussi

LES RACINES ET L'AVENIR DE DANONE SONT BASÉS SUR LA DIFFÉRENTIATION PAR LA SCIENCE



LES FERMENTS,
LA SANTÉ INTESTINALE,
LES BIOTIQUES



L'IMMUNITÉ, L'ALLERGIE,
LE LAIT MATERNEL, LA
NUTRITION MÉDICALE
ET L'HYDRATATION



LA DURABILITÉ
LES
EMBALLAGES

APPORTER LA SANTÉ PAR L'ALIMENTATION AU PLUS GRAND NOMBRE



LA SCIENCE AU COEUR DE DANONE

3

Figure 2

La mission de Danone.

la nutrition médicale moins connue par les consommateurs, l'hydratation et enfin le développement durable et les emballages qui sont des axes clés de l'innovation de Danone.

L'objectif et la mission clé de Danone sont d'apporter la santé par l'alimentation au plus grand nombre, et cela tout au long de la vie (**Figures 2 et 3**).

Pour cela, Danone met sur le marché une gamme de produits extrêmement variés destinés à répondre aux besoins nutritionnels et à l'équilibre alimentaire des consommateurs à différents stades de la vie.

Notre portefeuille de marques couvre des produits pour les bébés jusqu'aux seniors, que ce soient des produits laitiers ou des produits végétaux, des eaux minérales et des boissons.

Dans le cadre de notre démarche d'innovation dans ce large domaine, nous sommes amenés à relever de multiples challenges en mobilisant l'expertise de nos équipes pour optimiser nos formulations. Cela implique une sélection rigoureuse des matières premières, des ingrédients ainsi que des process¹ utilisés. Ces innovations permettent le développement de produits adaptés et différenciés, tout en intégrant une démarche de responsabilité environnementale.

2 La science derrière un yaourt

Pour accompagner ces innovations et répondre à ces

exigences nutritionnelles et sensorielles, la caractérisation moléculaire des produits est essentielle. La recherche analytique s'appuie sur une équipe multidisciplinaire d'ingénieurs et de techniciens analystes : chimistes, biochimistes, physiiciens et microbiologistes.

Ces caractérisations sont conduites en interne, mais s'appuient aussi sur des partenaires externes, notamment des équipes académiques ou des start-up qui vont nous apporter des expertises complémentaires et de nouveaux outils d'analyse innovants.

On va parler de chimie dans ce chapitre, et plus particulièrement de biochimie², approche indispensable à la caractérisation moléculaire des produits fermentés. Les mesures physiques sont également essentielles pour analyser le comportement et la structure des molécules afin

2. Étude des réactions chimiques au sein des êtres vivants.



Figure 3

Un portefeuille de produits de Danone couvrant toutes les étapes de la vie.

1. Procédés.

de répondre aux exigences de texture des produits.

Enfin, nous avons vu que la fermentation est à l'origine du Groupe Danone. La microbiologie³ et la biologie moléculaire sont évidemment des domaines clés pour une meilleure connaissance du comportement de nos bactéries lactiques.

Les sciences analytiques sont très importantes et représentent un accélérateur d'innovation. Notre mission est de caractériser les produits, ce qui nécessite une connaissance approfondie des ingrédients, des matières premières et de l'impact des procédés sur la formulation. C'est ce qui nous permet de mieux

comprendre nos produits au regard des préférences des consommateurs, et particulièrement les liens entre les descripteurs sensoriels, les molécules analysées et leurs caractéristiques chimiques, mais aussi les paramètres physiques. Nous traduisons ensuite ces liens en leviers technologiques sur lesquels les développeurs peuvent jouer pour mettre sur le marché les produits qui correspondent le mieux aux attentes des consommateurs.

2.1. Un yaourt, c'est quoi ?

Avant de partager des exemples concrets de caractérisation moléculaire, revenons à la chimie ou plutôt à la biochimie du yaourt.

Un yaourt, c'est, en fait, la rencontre essentielle entre

3. Science des micro-organismes.



Figure 4

Les bactéries et les molécules produites dans un yaourt.

une matière première, le lait de vache, et des bactéries baptisées par conséquent « lactiques » (Figure 4). Ces bactéries trouvent dans le lait tout ce dont elles ont besoin pour se développer et se multiplier : une source azotée⁴ avec les protéines, une source carbonée⁵ avec les sucres.

Si l'on se concentre sur la partie glucidique, en l'occurrence le lactose, elles le métabolisent pour produire de l'acide lactique. Cet acide lactique est important parce qu'il diminue le pH du lait. Lorsque ce pH atteint 4,6, qui a la particularité d'être exactement le point isoélectrique⁶ des caséines⁷, il entraîne leur déstabilisation. À ce point isoélectrique, les caséines, devenues neutres, se déstabilisent et s'agrègent entre elles. Et c'est là que le miracle de la texture du yaourt apparaît, grâce à ces interactions protéiques.

2.2. La texture : le rôle des bactéries lactiques

Mais il n'y a pas que les protéines qui créent de la texture dans les produits laitiers fermentés. Un premier exemple concerne la capacité des ferments à produire des sucres particuliers : les exopolysaccharides⁸.

Prenons l'exemple d'un Activia (Figure 5), mais cela pourrait être n'importe quel autre produit laitier fermenté.

Les exopolysaccharides sont des sucres polymères⁹ que les bactéries produisent. La création de liaisons entre sucres simples permet de construire un polysaccharide de très grande taille : on peut atteindre plusieurs millions de daltons¹⁰, ce qui est énorme par rapport aux protéines.

Danone dispose d'une collection, appelée « souchothèque », contenant plus de 2 000 micro-organismes différents dont certains ont la capacité de produire ces polysaccharides de très grande taille.

Les enchaînements de monosaccharides, motifs de base de ces polysaccharides, peuvent être extrêmement différents selon la bactérie

9. Longues molécules constituées d'un motif répété.

10. Unité de masse d'un atome. Un dalton équivaut environ à la masse d'un atome d'hydrogène.

4. Qui contient des atomes d'azote.

5. Qui contient des atomes de carbone.

6. pH pour lequel la charge électronique globale de la molécule est nulle.

7. Protéines du lait.

8. Les exopolysaccharides (EPS) sont des polymères glucidiques de haut poids moléculaire produits par des micro-organismes comme les bactéries lactiques dans leur environnement extérieur (ici le yaourt).



Figure 5

Activia, une gamme de yaourts Danone pour toutes les générations.

utilisée. Si l'on regarde le rhamnose, la galactosamine, le galactose, le glucose, en fonction des souches bactériennes sélectionnées, on pourra obtenir des motifs très différents d'exopolysaccharides (**Figure 6, en bas à droite**).

Le fait d'avoir des motifs différents entraîne des textures différentes. Comme on peut le voir sur les cuillères représentées au-dessus (**Figure 6**), on peut avoir des exopolysaccharides qui confèrent des textures plus liquides, qu'on appelle des « textures filantes », jusqu'à des textures beaucoup plus fermes, dites « cassantes ». On va donc pouvoir jouer sur les souches pour donner des textures d'intérêt à nos produits.

2.3. Les protéines au service de la texture

Comme nous l'avons vu précédemment, au point isoélectrique de 4,6, les caséines se déstructurent, coagulent et amènent la texture au produit laitier fermenté. Les protéines sont donc importantes si l'on veut obtenir une bonne texture à nos produits. Prenons l'exemple de HiPRO (**Figure 7**), un produit riche en protéines lancé il y a quelques années à destination des sportifs : environ trois fois plus de protéines que retrouvées naturellement dans le lait.

La qualité des protéines et l'état des protéines sont importants pour garantir les qualités d'un produit laitier à destination des sportifs.



Figure 6

Influence du type de bactéries lactiques sur la composition des exopolysaccharides et sur la texture, en fonction des différentes combinaisons de monosaccharides.

Sur le profil chromatographique d'un produit HiPRO obtenu par chromatographie liquide¹¹ représenté ici (*Figure 8, à gauche*), chaque pic caractérise spécifiquement une protéine laitière. Il y a différents types de protéines laitières : les caséines sur la partie gauche du profil et les protéines sériques sur la partie droite. La surface du pic est proportionnelle à la quantité de protéines détectée. Quand on compare les deux profils chromatographiques¹², on voit, par comparaison avec le lait, le profil en noir en dessous, que l'on a exactement le même profil chromatographique. Cela indique que les

11. Technique séparative d'analyse chimique.

12. Allures des courbes de chromatographie.



Figure 7

HiPRO, un produit laitier riche en protéines.

caractéristiques physicochimiques des protéines sont préservées, assurant une bonne qualité de protéines pour la récupération musculaire.

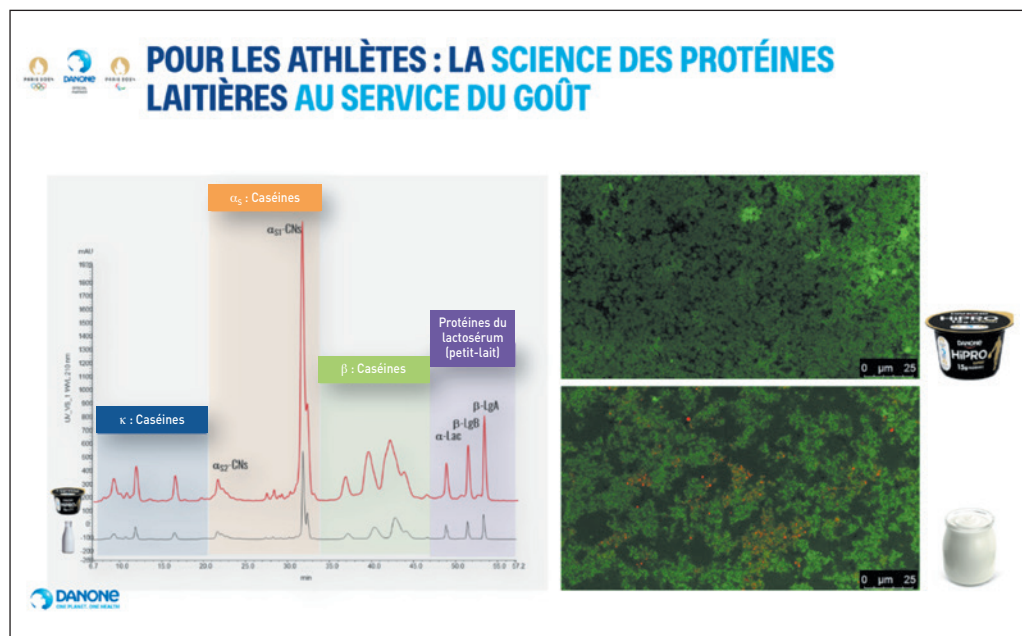


Figure 8

À gauche, analyse chromatographique des protéines de HiPRO. À droite, images de microscopie confocale.

Le deuxième aspect de cette qualité protéique, c'est la création de la texture dans le produit. Si l'on regarde les images de microscopie (**Figure 8, à droite**), elles ont été obtenues par microscopie confocale. La microscopie confocale permet, dans ce cas précis, de révéler et de détecter spécifiquement, sous un faisceau laser particulier, les protéines en vert et la matière grasse en rouge. L'image du haut (**Figure 8**) représente l'HiPRO, celle du bas correspond à un yaourt classique : on voit bien que le réseau protéique créé est beaucoup plus dense en haut qu'en bas. C'est ce qui donne cette texture dense particulière à HiPRO, adaptée aux attentes des consommateurs.

2.4. Les ferments et le goût des yaourts

Si la texture est un facteur clé pour la perception sensorielle, l'aromatique est aussi important. On a la chance, par le biais des bactéries, comme on l'a vu pour les exopolysaccharides, de pouvoir disposer d'une variété de souches extrêmement importante. Lors de la fermentation, ces bactéries produisent des composés volatils de façon différente en fonction du type de micro-organisme étudié.

On peut ainsi clustériser¹³ les bactéries lactiques sur leur capacité à produire des métabolites¹⁴ de fermentation, et plus précisément les composés volatils (chaque petit rond

de la **figure 9** correspond à une bactérie différente¹⁵). On peut par exemple voir qu'on a un cluster¹⁶, le plus important en jaune pâle (**Figure 9, à gauche**), qui génère une classe organoleptique¹⁷ associée à une production importante de diacétyle, qui donne des notes « crème-beurre », qui sont des notes positives dans un produit laitier. C'est aussi le cas avec l'acétaldéhyde (**Figure 9, en haut à droite**), qui va donner des notes fraîches d'agrumes, agréables, et qui contribue à la note « yaourt frais ». Par contre, cela peut parfois amener des notes un peu moins désirées, comme on peut le voir avec l'oct-1-èn-3-ol (**Figure 9, en bas à droite**), qui donne des notes plutôt « terreuses, champignon », ou l'acide acétique produit par certaines bactéries, comme *Bifidus*, qui apporte un goût beaucoup plus acide en bouche que l'on peut définir comme « vinaigre ». On dispose d'une panoplie d'options possibles avec les micro-organismes avec lesquels nous allons pouvoir jouer.

Restons sur l'exemple de HiPRO pour explorer l'univers des saveurs possibles selon les ferments utilisés et les process mis en œuvre. Plus de 200 molécules sont détectées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse dans l'HiPRO vanille. Environ 25 d'entre elles contribuent majoritairement à son goût, et permettent d'établir la roue des saveurs (roue organoleptique, **Figure 10**).

13. Anglicisme qui signifie « grouper ».

14. Molécules organiques issues d'un métabolisme.

15. Ici, molécules odorantes.

16. Groupe.

17. Famille de goûts ou d'odeurs.

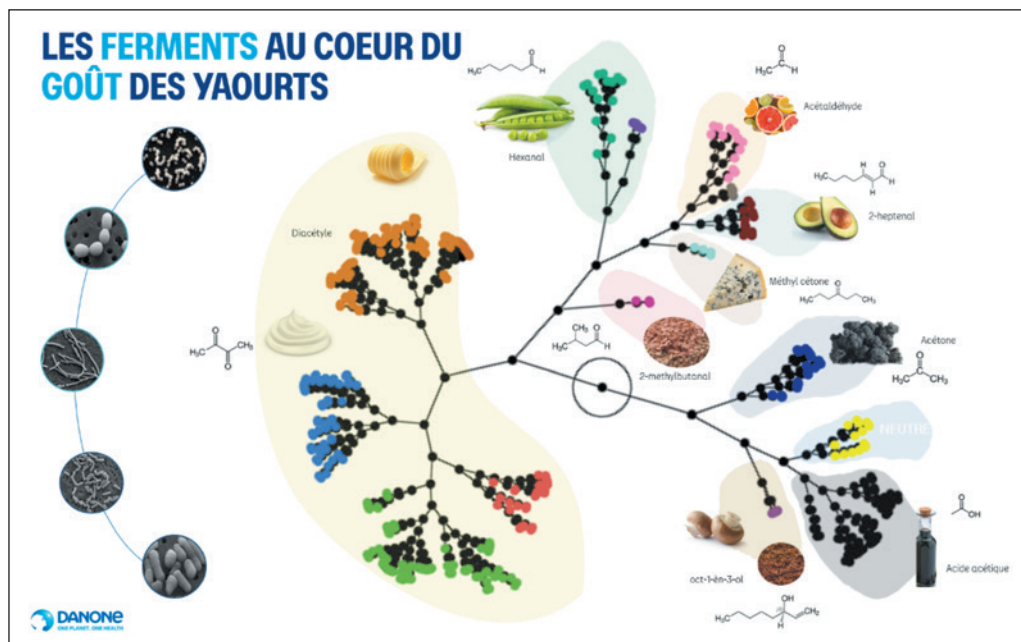


Figure 9

Clustérisation des souches de bactéries lactiques en fonction des molécules volatiles produites ayant un impact organoleptique.

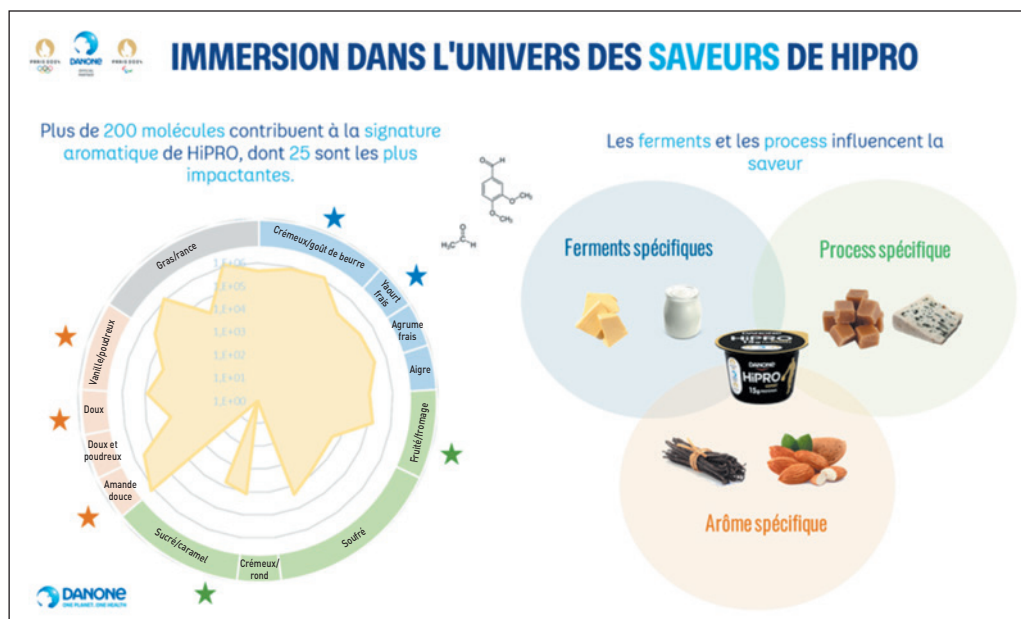


Figure 10

Roue organoleptique des composés volatiles dans HiPro.

Ces 25 molécules les plus importantes sont regroupées dans des classes organoleptiques, ce qui crée la roue à gauche de la **figure 10** représentant la signature de l'HiPRO vanille. En fonction des types de molécules, on sait les associer à leur origine. Les étoiles correspondent à certaines molécules clés. Parmi les étoiles bleues, on peut noter la présence du diacétyl et de l'acétaldéhyde vus précédemment. Les ferments spécifiques utilisés dans HiPRO permettent de produire de façon marquée ces molécules amenant ces notes positives crème-beurre et yaourt, composant la zone bleue. La partie verte représente certains composés volatils créés lors du process, notamment par traitement thermique, et qui apportent des notes fruitées ou rondes, équilibrant bien celles issues des ferments. Enfin, pour la partie arôme vanille, les molécules volatiles le composant équilibrent et apportent une rondeur, une perception

agréable de cet arôme vanille en bouche.

3 Caractérisation moléculaire et amélioration des procédés

Nous avons vu les deux axes qui sont extrêmement importants pour la partie sensorielle : la texture et l'aromatique. Voyons, avec l'exemple d'Aptamil (**Figure 11**), les bénéfices que peuvent apporter les procédés technologiques innovants.

Aptamil est un produit que nous avons développé par le biais de l'application d'un procédé technologique innovant développé au sein du Groupe Danone, appelé Nuturis®. L'objectif de ce procédé est de produire un globule gras¹⁸ extrêmement proche de celui du lait maternel afin d'en reproduire les bénéfices. Comme on le voit dans cet

18. Gouttelette de gras entourée d'une membrane.



Figure 11

Aptamil, un lait infantile en poudre nouvelle génération.



Figure 12

Schéma comparatif des globules gras de laits infantiles vs le lait maternel.

exemple (Figure 12), le globule gras de Nuturis et celui du lait maternel sont extrêmement proches en termes de structure et de taille, ce qui est moins le cas dans les formules infantiles standard, où le globule gras est environ 10 fois plus petit et plus simple.

Tout l'objet de notre travail consiste à nous assurer, par le biais d'approches analytiques, de la structure du globule gras, notamment l'homogénéité de sa répartition, mais aussi sa composition moléculaire, en particulier la partie protéique qui structure le globule gras. Cette spécificité confère un comportement différent par rapport aux formules infantiles standard.

Nous avons été confrontés, selon le type de procédé appliqué, à des comportements différents lors de la

solubilisation¹⁹ de la poudre de lait dans de l'eau chaude, en fonction de l'agitation et donc de l'énergie appliquée. Malgré la combinaison d'approches analytiques physicochimiques complémentaires déployées en interne, nous n'avons pas identifié de différences significatives de structure de la poudre pouvant expliquer une moins bonne solubilisation avec peu d'agitation.

Pour aller plus loin dans la caractérisation structurelle de la poudre de lait, nous avons réalisé une étude en partenariat avec le synchrotron SOLEIL. Grâce à l'accélérateur de particules, de hauts niveaux d'énergie permettent d'explorer avec plus de résolution la matière en profondeur. Comme

19. Dissolution de la poudre.

on peut le voir (*Figure 13, à droite*), en utilisant la micro-tomographie RX²⁰, nous avons constaté que la structure physique de la poudre pouvait expliquer un comportement différent de la migration de l'eau. Dans le cas où il y avait plus d'espaces entre les particules de poudre et des alvéolations²¹ plus importantes (*Figure 13, en haut à gauche*), la migration de l'eau chaude – et donc la solubilisation – était facilitée. Sur la base de ces résultats, nous avons pu savoir exactement quels paramètres process appliquer pour obtenir une poudre adaptée à une bonne solubilisation.

20. Technique d'imagerie 3D par rayons X.

21. Cavités, pores.

4 Analyse moléculaire et choix des matières premières

Je voulais finir avec un dernier exemple, concernant YoPRO (*Figure 14*), pour illustrer que l'innovation peut amener à relever des challenges inattendus.

Lors du développement de YoPRO, un produit riche en protéines, l'innovation ne posait aucun problème sur l'ensemble des formules, à l'exception de la formule cacao, que nous souhaitions lancer sur le marché. Cette recette présentait un aspect granuleux très visible et non acceptable.

Malgré les différents essais de formules et de process des développeurs, aucune solution ne permettait d'éviter ces

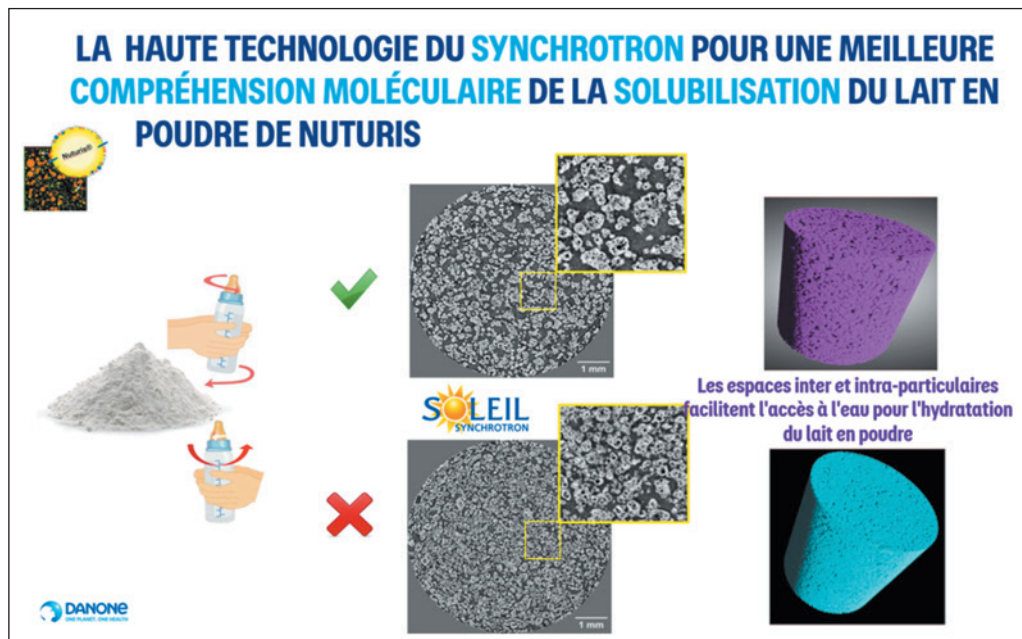


Figure 13

Structure micro-tomographique aux rayons X de la poudre infantile.

grains. En analysant le produit, et en nous concentrant sur la dimension protéines, nous avons découvert que l'agrégation²² des protéines était importante, en particulier en présence de cacao. Sur l'image en haut à gauche (**Figure 15**), en vert, on observe des particules marron, que l'on peut attribuer au cacao. Ce phénomène peut s'expliquer par la richesse en polyphénols²³ du cacao, que nous savons être un facteur pouvant favoriser l'agrégation des protéines. Nous avons donc retravaillé avec les fournisseurs pour obtenir des cacaos moins riches en polyphénols. Comme on peut le voir sur la

22. Agglomération, amas.

23. Famille de molécules issues de végétaux.



Figure 14

YoPRO, gamme de produits laitiers hyperprotéinés de Danone.

partie de droite (**Figure 15**), nous avons ainsi obtenu une texture lisse conforme aux attentes des consommateurs.

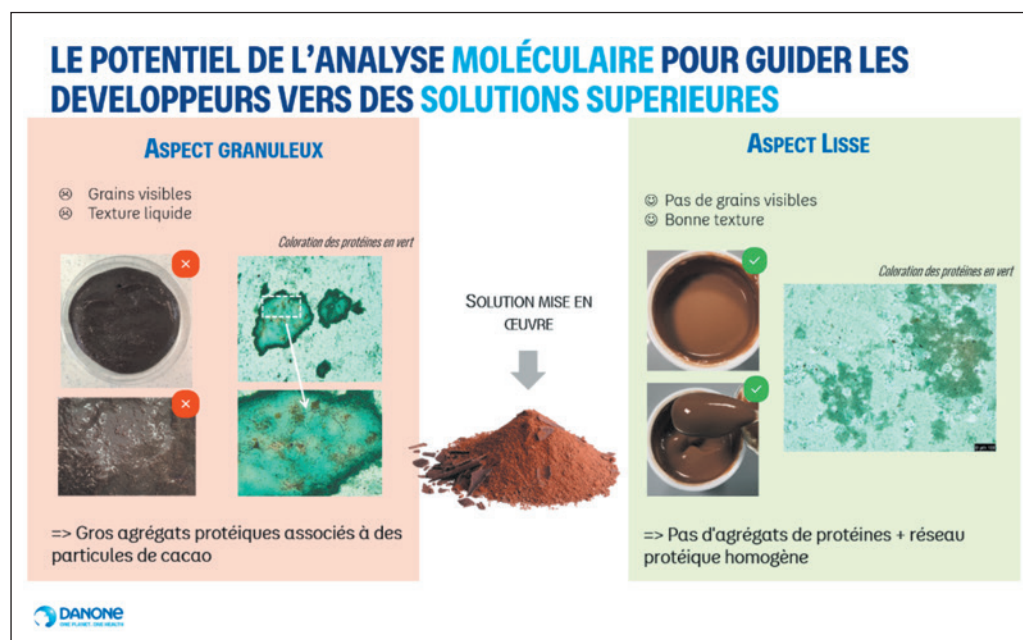


Figure 15

Photos et vues au microscope de la structure de produits laitiers YoPRO cacao.

Conclusion

Malgré la connaissance moléculaire approfondie de nos produits, il nous reste toujours des challenges à relever.

Il est important, par exemple, de se rapprocher du *in vivo* et de développer davantage la dynamique sensorielle, notamment sur les séquences aromatiques en bouche, ou la texture en bouche.

Le deuxième aspect est la physiologie bactérienne ainsi que la compréhension des interactions entre les bactéries lactiques dans nos produits fermentés.

Enfin, le digital et la gestion des données sont essentiels ; nous cherchons à adopter de nouvelles stratégies, notamment des approches d'intelligence artificielle, pour modéliser et prédire des comportements.

Pour conclure, l'ensemble de ces connaissances ne peut être atteint sans l'engagement quotidien d'experts passionnés dans l'équipe Analytical Sciences qui abordent les produits avec l'œil de l'enquêteur en mode « NCIS » ou « les Experts ».

Quand la chimie et les arômes réinventent l'alimentation de demain

D'après la conférence de Margaux Cavailles, responsable de la création aromatique et du développement stratégique chez MANE. Elle est aromaticienne et possède plus de dix ans d'expérience dans l'industrie des arômes et parfums.

1 Introduction

La couleur, les arômes, mais surtout la chimie, sont le point commun entre ces gousses de vanille de la **figure 1** et les bonbons.

La chimie est partout, même dans la nature, et les arômes sont une application de la chimie. La gousse de vanille est en fait remplie de chimie, et pas seulement sur la partie aromatique.

Quel est le point commun entre une gousse de vanille et ces bonbons ?



Figure 1

La chimie des arômes.

Parmi les industries qui développent aujourd'hui les arômes et les parfums figure MANE, une société familiale, premier groupe français et cinquième au niveau mondial (*Figure 2*).

Cette entreprise familiale est aujourd'hui dirigée par la cinquième génération, par Mlle Mane, présidente (*Figure 2*). MANE est un groupe qui fait beaucoup de recherches en chimie, notamment sur la partie arômes et parfums.

Les chiffres de la *figure 3* illustrent la présence de MANE au niveau mondial, mais également la répartition en trois domaines de l'entreprise, avec une division Arômes, une division Parfumerie et une division qu'on appelle « Ingrédients », où se retrouvent tous les extraits et toutes les molécules qu'on peut vendre directement en l'état.

2 Les arômes

Les arômes jouent un rôle essentiel, que ce soient les arômes présents naturellement dans le végétal, et dans tout ce qui nous entoure, ou ceux que nous allons créer (*Figure 4*).

Les arômes améliorent le goût et l'expérience sensorielle, ce que nous allons illustrer avec quelques exemples.

Parlons de la manière dont les arômes peuvent réinventer l'alimentation de demain, car les clients demandent une augmentation de l'expérience sensorielle. Le système trigéminal¹, incluant l'olfaction et le goût, permet la perception des informations

1. Relatif au nerf trijumeau qui permet le fonctionnement du goût et de l'odorat.

Une histoire familiale unique, et une aventure d'entreprise



La 5^{ème} génération

Perpétue le même savoir-faire et les mêmes engagements

Depuis plus d'un siècle et demi, MANE allie science et créativité, industrie et émotion, tout en conservant son statut d'entreprise familiale avec une identité unique et des capacités nourries par notre passion, en utilisant des technologies de pointe, notamment en biologie, chimie organique et expertise en extraction.



Edouard Mane
Expert Solutions
Business
Opérations



Victor Mane
Directeur, Création,
Fine Fragrance &
Ingrédients



Aurene Mane
Directrice
création FCO
USA



Raphaël Toget
Manager
Développement
Chimique



Samantha Mane
Présidente

Figure 2

Un peu d'histoire de l'entreprise MANE.

chimio-sensorielles de notre environnement. Au travers des arômes, outre une tonalité fraise, pêche, framboise ou grenade, comme celle des fruits de la **figure 4**, on va rechercher une véritable expérience rafraîchissante,

on parle de «coolings²», ou une expérience plutôt chauffante. C'est le cas des bonbons comme les «Têtes brûlées», ou encore des chips où, de plus

2. Anglicisme signifiant «rafraîchissants».

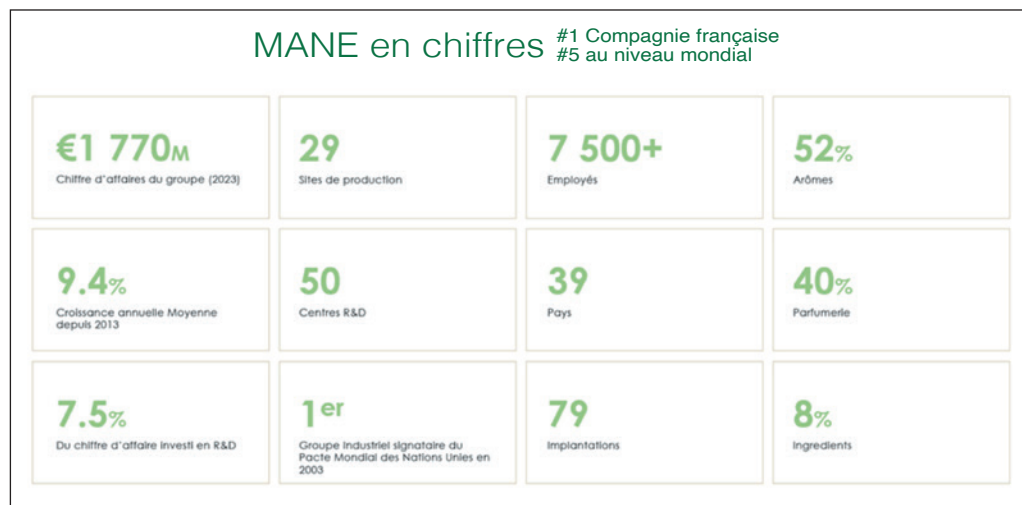


Figure 3

MANE en quelques chiffres.



Figure 4

Les apports des arômes et exemples de fruits et de plantes produisant des arômes.

en plus, on augmente la dose de l'effet chauffant.

Les arômes permettent d'innover et de répondre aux attentes des consommateurs. Je vais vous donner un exemple tiré de mon expérience personnelle.

En 2013, à l'occasion de la préparation des Jeux olympiques et de la Coupe du monde de 2014 au Brésil, on m'a demandé, en tant qu'aromaticienne, de développer des arômes de fruits brésiliens : c'était une manière de faire voyager les consommateurs à travers des arômes innovants et de répondre à leurs attentes du moment.

Sur ce sujet, un point crucial est l'analyse sensorielle. Dans nos équipes, ce ne sont pas les aromaticiens, mais les services d'analyse sensorielle et connaissance du consommateur qui décryptent les attentes des consommateurs. Il est important de noter qu'une vanille en France ou en Asie n'est pas la même, et que même entre l'Allemagne et la France, nous n'avons pas les mêmes profils.

Les arômes sont indispensables pour compenser les pertes de saveur, par exemple dans le cas de tous les produits qui sont chauffés. L'objectif est de rééquilibrer le goût final et de masquer les « off-notes³ ». C'est un sujet important dans le cas des protéines végétales.

Le dernier point, mais pas des moindres, concerne **la standardisation et la réduction du coût des produits**. Standardiser, dans le sens où, par exemple, avec le changement climatique, il peut y avoir des problématiques autour de la disponibilité des matières premières, c'est actuellement le cas de l'orange. Aujourd'hui, les industriels de l'aromatique utilisent des huiles essentielles d'orange. Or, actuellement, il y a une maladie des oranges, le « greening⁴ », qui, finalement, augmente le coût de l'huile essentielle et crée des déviations du profil organoleptique⁵. Les arômes sont donc une solution pour compenser ces problématiques.

Le sondage (**Figure 5**) réalisé par Opinion Way à la demande du SNIA⁶ confirme cet argumentaire. La question posée aux Français était : « Pour vous, à quoi servent les arômes ? » Les trois premières fonctions qui ressortent sont : renforcer l'intensité du goût du produit, faire en sorte qu'un produit ait toujours le même goût et remplacer des matières premières rares et/ou chères.

3 Les substances aromatiques

Un arôme est donc un ingrédient qui apporte un goût et/ou une odeur spécifique à l'aliment auquel il est incorporé à très petite dose. **Mais comment un arôme est-il composé et fabriqué ?**

4. « Verdissement ».

5. Relatif au goût et à l'odeur.

6. Syndicat National des Ingrédients Aromatiques Alimentaires.

3. Saveurs indésirables, arrière-goûts désagréables.

Pourquoi les arômes sont-ils essentiels ?

Pour réaliser un arôme, il y a des recettes dont la base est résumée sur la **figure 6**.

La base est constituée des solvants ou des supports d'arôme qui permettent de solubiliser

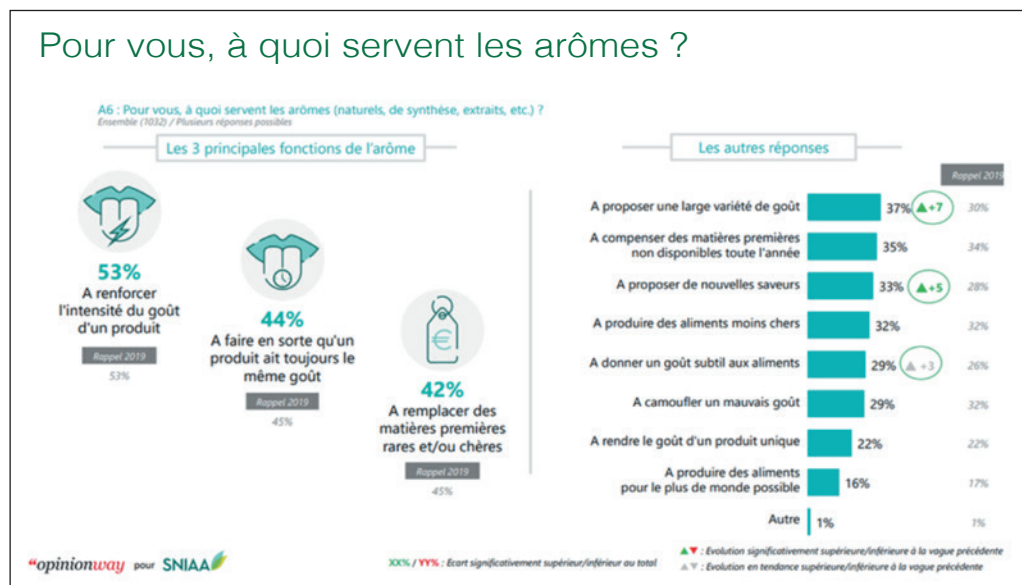


Figure 5

Sondage sur les arômes.

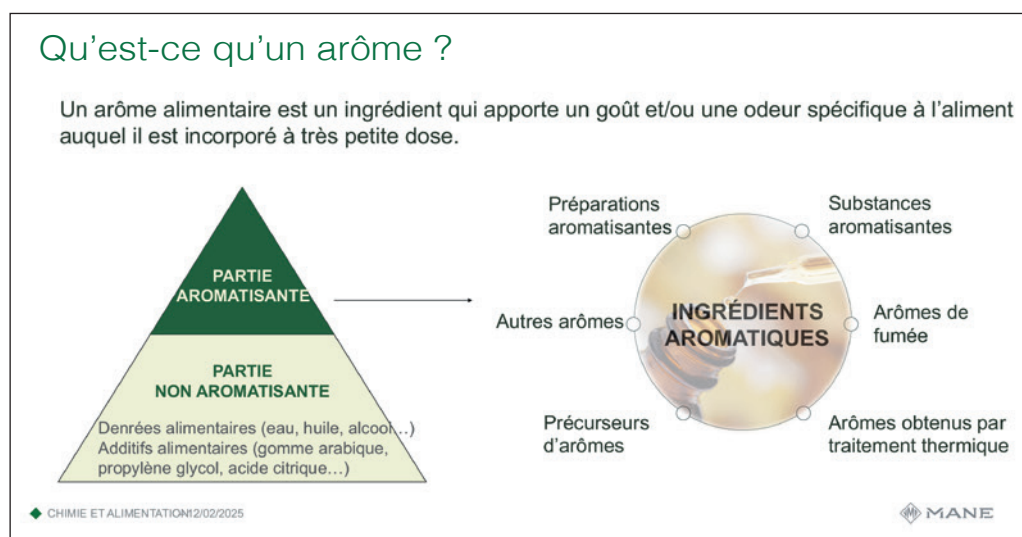


Figure 6

Bases et catégories d'arômes.

et de diluer les molécules aromatiques très puissantes, et d'adapter l'arôme en fonction des conditions et des besoins.

On peut utiliser de l'eau et de l'alcool pour faire des arômes qui seront utilisés dans des boissons. À l'inverse, on prendra des solvants plutôt liposolubles⁷, des huiles notamment, pour des applications liposolubles, comme dans le chocolat ou dans les produits culinaires. Nous voyons sur la pyramide de la **figure 6** que cette base constitue environ 70 à 90 % selon les arômes.

La **partie aromatisante** est la plus intéressante. On a **six catégories d'ingrédients** (**Figure 6**) de **préparations aromatisantes** (les termes utilisés sont ceux de la réglementation aromatique) également appelées «extraits», qui sont des

molécules d'origine synthétique ou naturelle (**Figure 7**).

La chimie permet de reproduire une substance possédant des propriétés aromatisantes, définies par une formule chimique. D'un point de vue réglementaire, on peut avoir soit une molécule synthétique obtenue par des procédés de chimie, ou une molécule d'origine naturelle préparée par des procédés de la chimie du vivant (biotechnologies), ou des processus⁸ physiques, par exemple le menthol, qui est extrait de la menthe.

Majoritairement, c'est par la biotechnologie et la chimie que l'on prépare les substances aromatiques. Voyons quelques exemples.

Il y a des molécules connues et reconnues pour leurs profils clés selon les tonalités : le cis-3-hexénol, qu'on

7. Qui ont une affinité avec le gras.

8. Procédés.

Focus sur les substances aromatiques

La chimie permet de reproduire une **substance** possédant des propriétés aromatisantes

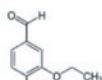
↓
Définie par une formule chimique = Molécule

Synthétique: Obtenue via des process de chimie

Naturelle: Obtenue via des process de «chimie du vivant» ou process physique



Cis-3-hexenol



Ethyl Vanilline



Vanilline



Benzaldéhyde



Limonène



Citral



Figure 7

Molécules aromatisantes.

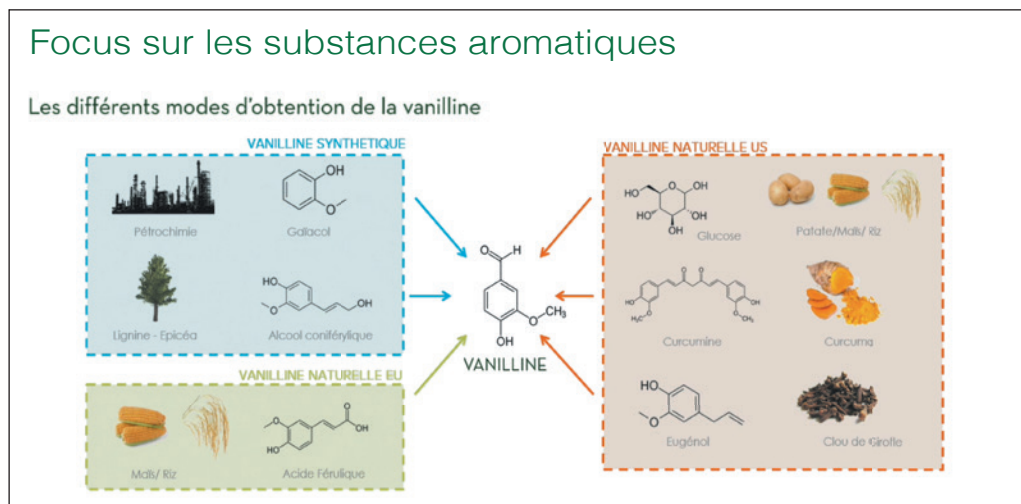


Figure 8

Modes d'obtention de la vanilline à partir d'autres molécules.

peut retrouver aussi comme l'« herbe coupée », qui est majoritaire dans des arômes de pomme verte.

L'éthylvanilline et la vanilline permettent de voir aussi la beauté de la chimie, dans la mesure où l'éthylvanilline est une pure création de la chimie. C'est une molécule que l'on ne retrouve pas dans la nature, mais qui confère un profil quasiment 10 fois plus puissant que la vanilline, présente dans la vanille.

Le benzaldéhyde correspond à la note typique de l'amande. Le limonène et/ou le citral sont des composés caractéristiques du citron et de l'orange, respectivement.

Les arômes sont régis par des réglementations et des textes réglementaires qui sont différents selon les pays, mais il faut aussi parler de la chimie des ingrédients. Prenons le cas de la vanilline, dont on peut voir les différents modes

d'obtention d'une même molécule (Figure 8). Selon les procédés d'obtention, on va avoir différents termes et différents noms.

4 Les arômes et l'attente du goût naturel

Ce sondage réalisé auprès des consommateurs (Figure 9) montre l'attente en termes de naturalité mais pas forcément au niveau réglementaire.

La question posée était : « Quelles sont vos trois principales exigences lors de la consommation d'un produit alimentaire contenant un arôme ? » **La première exigence, c'est un goût naturel ; en second, un goût reconnaissable.**

Pour un aromaticien, un goût naturel est ce qu'on va appeler un goût « authentique », proche de la nature, que le consommateur peut reconnaître

Une attente de naturel très présente

B7 : Quelles sont vos 3 principales exigences lors de la consommation d'un produit alimentaire contenant un arôme (naturels, de synthèse, extraits, infusions etc.) ? en 1er, en 2ème, en 3ème ?
Ensemble (1032)

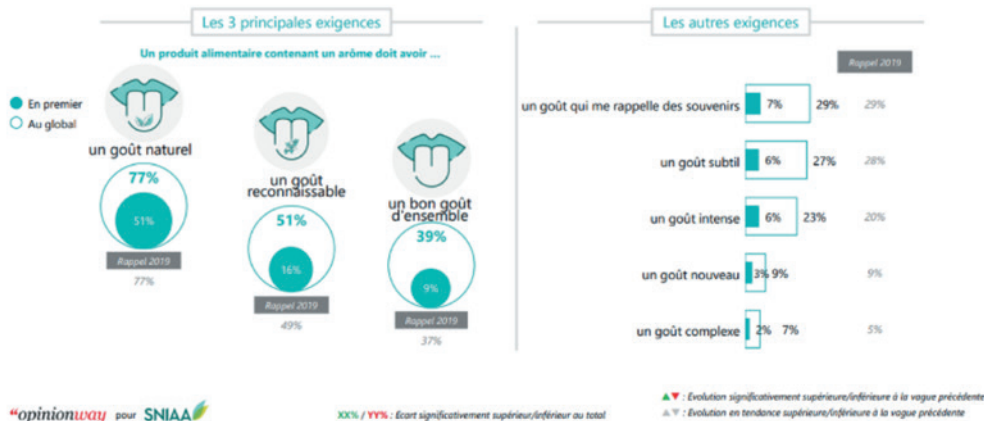


Figure 9

Sondage sur l'attente des consommateurs vis-à-vis des arômes.

en consommant le produit de départ et pas forcément l'arôme.

Par exemple, dans le cas de l'arôme fraise, on ne va pas le recréer, car il est bien fait, mais on va faire de la recherche pour apporter la touche d'authenticité attendue par le consommateur.

La **figure 10** résume le processus de création de l'arôme pour obtenir le côté authentique.

Le premier point est l'exploration des matières premières disponibles au niveau mondial, qu'elles soient connues ou inconnues, et il faut pouvoir goûter les produits.

Le deuxième point est l'utilisation des outils analytiques et d'analyse sensorielle pour décrire la matière première sélectionnée.

Ensuite, à partir de l'expertise des matières premières, il faut **mettre au point la formulation** pour obtenir un profil authentique.

Prenons comme exemples la fraise et le cacao.

Dans le cas de la fraise, qui consomme beaucoup d'eau et qui contient peu de molécules de goût puissant, l'arôme devra

Un goût naturel = profil authentique



Figure 10

Schéma du processus de création des arômes.

permettre de renforcer le goût tout en évitant de consommer trop de fraises.

Dans le cas du cacao, pour lequel il y a une flambée du coût des matières premières, beaucoup de clients demandent des solutions pour reproduire ce profil de cacao et compenser les problématiques de coût et de disponibilité des matières premières.

Quand on a obtenu les matières premières grâce à la chimie, la biotechnologie ou l'extraction, le gros outil des aromaticiens est avant tout l'analytique pour décrypter le naturel, le vivant, et réussir à s'inspirer de sa richesse.

Prenons l'exemple de la vanille, dans laquelle plus de 250 molécules ont été analysées.

Bien évidemment, dans nos arômes, il n'y aura pas 250 molé-

cules (heureusement pour la production), mais les techniques de l'analytique nous permettent de cartographier et de décrypter les molécules. La vanille, ce n'est pas que de la vanilline : ce sont 250 composés, parmi lesquels on peut, et c'est le cas de tous les produits naturels, essayer d'identifier entre 15 et 20 molécules clés caractéristiques qui nous aideront à reconstituer des profils authentiques (**Figure 11**). En effet, ce n'est pas uniquement la concentration de la molécule dans l'extrait qui compte, mais surtout sa puissance, et c'est un facteur qu'on corrèle entre concentration et puissance qui nous permet de parler de molécules impactantes et qui nous permet de réduire cette liste de 250 à 15 ou 20 composés pour créer l'arôme.

Revenons sur l'expertise des matières premières.

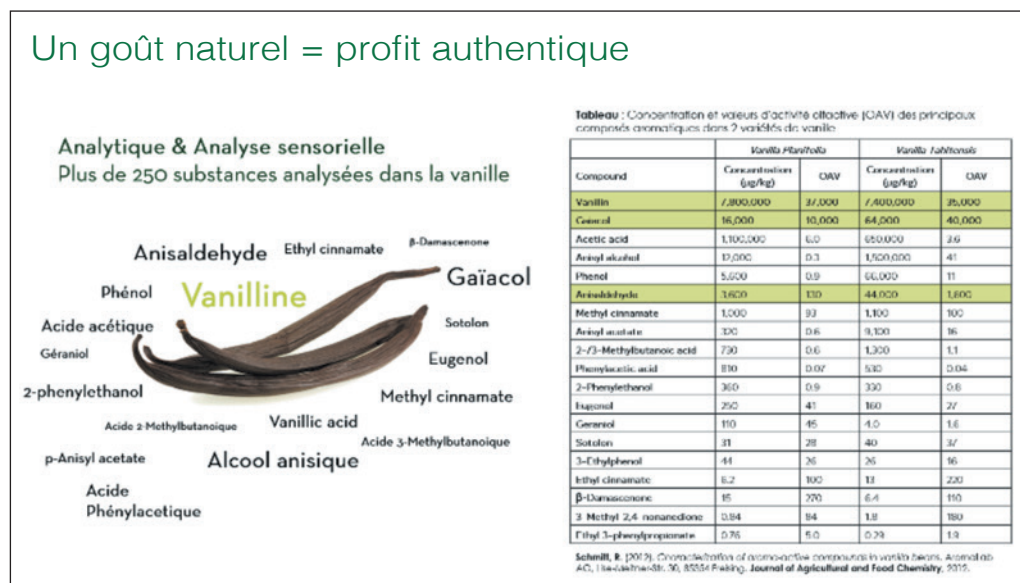


Figure 11

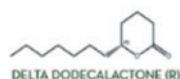
Liste des composés aromatiques présents dans une gousse de vanille.

Un goût naturel = profit authentique

L'expertise des matières premières

La chiralité joue un rôle fondamental dans le monde des arômes = diversité des profils aromatiques

♦ Des puissances différentes

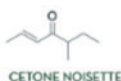


(R)-(-)-delta-dodecalactone - Fruité, lactonné, abricot
Seuil de détection = 500 ppb

(S)-(+)-delta-dodecalactone - Fruité, lactonné, abricot/pêche
Seuil de détection = 50 ppb



♦ Des profils différents



◆ CHIMIE ET ALIMENTATION - 12/03/2025



(R)-Trans: Noisette,
praline, chocolat



(R)-Cis: Fruits à coque,
vert, fruité



(S)-Trans: Noisette,
vert, fermenté,
chocolat



(S)-Cis: Noisette, vert,
côté gaz, fromage



◆ MANE

Figure 12

Effet de la chiralité sur des composés aromatiques.

La chiralité⁹ d'une molécule est extrêmement importante pour la puissance aromatisante d'une molécule : elle entraîne un facteur 10 entre celle de la (R)-delta-dodécalactone et celle de la (S)-delta-dodécalactone (Figure 12). Un autre exemple

9. La chiralité, c'est le fait qu'une molécule existe sous deux formes miroirs non superposables, un peu comme une main gauche et une main droite. Dans les substances aromatiques, cela signifie que deux versions « chirales » d'un même arôme peuvent sentir différemment, même si leur formule chimique est identique.

reporté (Figure 12) est celui de la cétone noisette, où la filbertone¹⁰ est la molécule caractéristique de la noisette. Les quatre représentations ont des profils différents. Dans la formulation d'un arôme noisette, et notamment quand on parle d'authenticité, on va chercher à éviter les notes très vertes, plutôt synthétiques, et à amener un côté un peu plus noisette grillée. Donc voilà, on va pouvoir aussi jouer à ce niveau-là.

10. Nom commercial de la cétone de noisette.

Conclusion

Le futur des arômes

L'impact environnemental est important pour l'industrie des arômes : des outils existent qui permettent de parler de durabilité aussi bien sur la chimie de synthèse que sur l'extraction. Nous avons développé un outil (**Figure 13**) basé sur les 12 principes de la chimie verte, résumés en 7 concepts.

Comme cela est montré dans d'autres chapitres de cet ouvrage, l'alimentation durable est un sujet important qui nous motive aujourd'hui pour créer les bons arômes et développer les bons produits plaisir, plus durables, de demain. Pour cela, la chimie est une alliée précieuse.

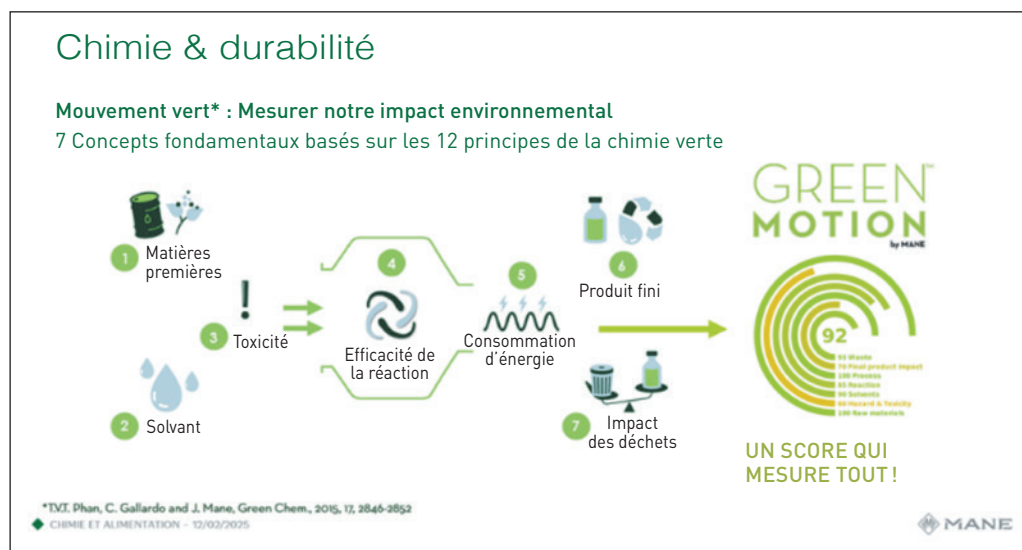


Figure 13

Green Motion, outil d'évaluation de l'impact environnemental.

Les texturants, une aide pour la nutrition des seniors

Après un doctorat à l'INSA¹ de Lyon, employé chez Cargill depuis 2013, Gino Mangiante a occupé différents postes en recherche et développement dans le domaine des texturants alimentaires². Depuis 2022, il a une position d'expert technique (produits et technologies) dans ce domaine dans la société Cargill.

La société Cargill, fondée en 1865, est un acteur majeur de l'agroalimentaire. Parmi les nombreuses activités du groupe, Cargill propose une gamme de solutions texturantes d'origine végétale parmi la plus étendue du marché. Les texturants sont des ingrédients ou additifs largement utilisés dans les produits alimentaires (et parfois cosmétiques ou pharmaceutiques) pour modifier ou améliorer la texture d'un produit (viscosité,

consistance, stabilité, sensation en bouche, etc.). Les texturants peuvent être d'origine végétale (carraghénane, pectine, etc.), obtenus par fermentation (xanthane), ou plus rarement à partir d'animaux (gélatine). Ce chapitre vise à faire un état des lieux de l'utilisation des texturants comme aide pour la nutrition des seniors.

1 Contexte d'une population vieillissante

Pour comprendre l'importance des texturants dans l'alimentation des seniors, il est essentiel de commencer

1. Institut National des Sciences Appliquées.

2. Les texturants comptent notamment les épaississants, les gélifiants, les stabilisants, les émulsifiants et les liants.

par observer les évolutions démographiques et les défis qu'elles posent. L'espérance de vie mondiale à la naissance est en constante augmentation depuis des décennies : alors qu'elle n'était que de 47,8 ans en 1960, elle est passée progressivement à 60,5, 66,4 et 73,5 ans, respectivement en 1980, 2000 et 2025³. Cette tendance s'observe aussi en France (**Figure 1**). Au-delà de l'espérance de vie à la naissance, la population des seniors augmente elle aussi. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) décrit cette population *via* trois catégories : les jeunes seniors (entre 60 et 75 ans), les seniors (entre 75 et 90 ans) et les grands seniors (plus de 90 ans). Cette dernière catégorie a été multipliée par 3 entre 1980 et 2000 et

par 2 entre 2000 et 2020. La présence de plus de personnes âgées dans la population générale impose une prise en charge spécifique et adaptée afin de poursuivre l'augmentation de l'espérance de vie et garantir une qualité de vie optimale malgré les pathologies et troubles liés à l'âge avancé. Parmi les troubles liés au vieillissement, la dysphagie occupe une place centrale en raison de ses impacts sur la nutrition et la qualité de vie.

2 La dysphagie et ses conséquences

La déglutition est l'action d'avaler. En temps normal, il s'agit d'un réflexe (involontaire) qui fait intervenir un nombre important de muscles dans un ordre spécifique (**Figure 2**). La déglutition salivaire s'opère environ deux fois par minute,

3. Source : www.worldometer.com.

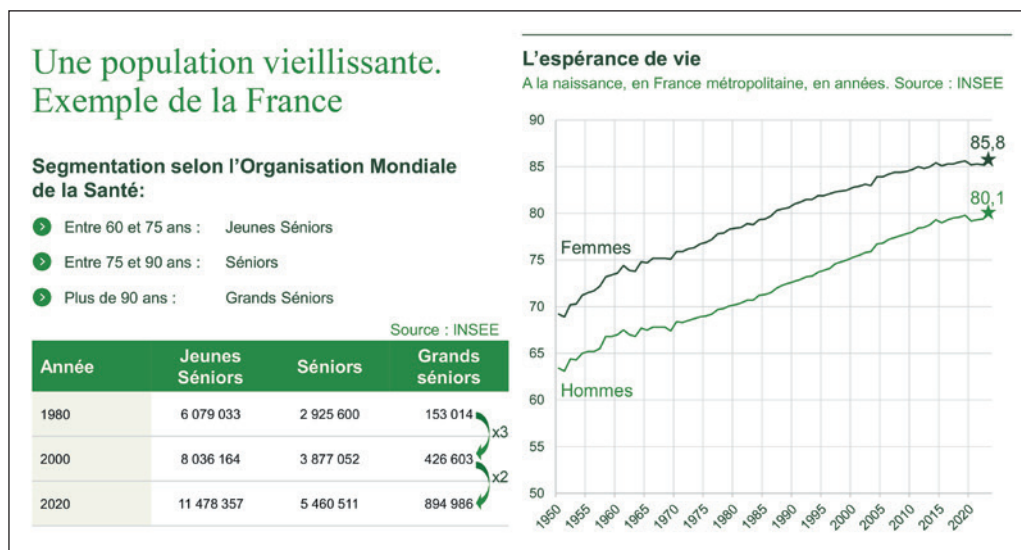


Figure 1

Population des seniors (à gauche) et évolution de l'espérance de vie en France (graphique de droite).

Source : INSEE.

soit 3000 fois par jour pour un être humain⁴. Lors des repas, cette déglutition est volontaire, mais l'enchaînement des contractions musculaires reste réflexe. La **figure 2** décrit de manière simplifiée les différentes étapes d'une déglutition dite « normale ». Lorsque la nourriture est dans la bouche, les voies respiratoires sont ouvertes, permettant la respiration sans encombre. Ce n'est que lorsque l'individu avale à proprement parler que la langue ferme la cavité buccale⁵ et que les aliments

passent dans l'estomac *via* le sphincter œsophagien supérieur⁶. À cette étape, les voies respiratoires sont closes afin que le bolus alimentaire ne se rende pas dans les poumons. Une fois le bolus alimentaire passé, les voies respiratoires sont de nouveau ouvertes pour permettre la respiration.

Si tout un chacun s'est déjà retrouvé dans la situation

4. Source : Afkari S., « Measuring frequency of spontaneous swallowing », *Australas Phys Eg Sci Med*. 2007; 30:313-7.

5. La cavité buccale comprend la langue, les gencives maxillaires (supérieures) et mandibulaires (inférieures), les joues, le palais et le plancher buccal.

6. Muscle en forme d'anneau autour d'un orifice naturel qu'il ferme en se contractant. L'orifice naturel est, ici, l'œsophage, tube musculaire creux qui permet le passage de la nourriture de la bouche à l'estomac et mesurant de 25 à 33 cm de long et moins de 2,5 cm de large dans sa partie la plus étroite. L'œsophage prend naissance dans la gorge, ou pharynx, et se termine dans l'estomac. Synonyme : muscle de l'œsophage.

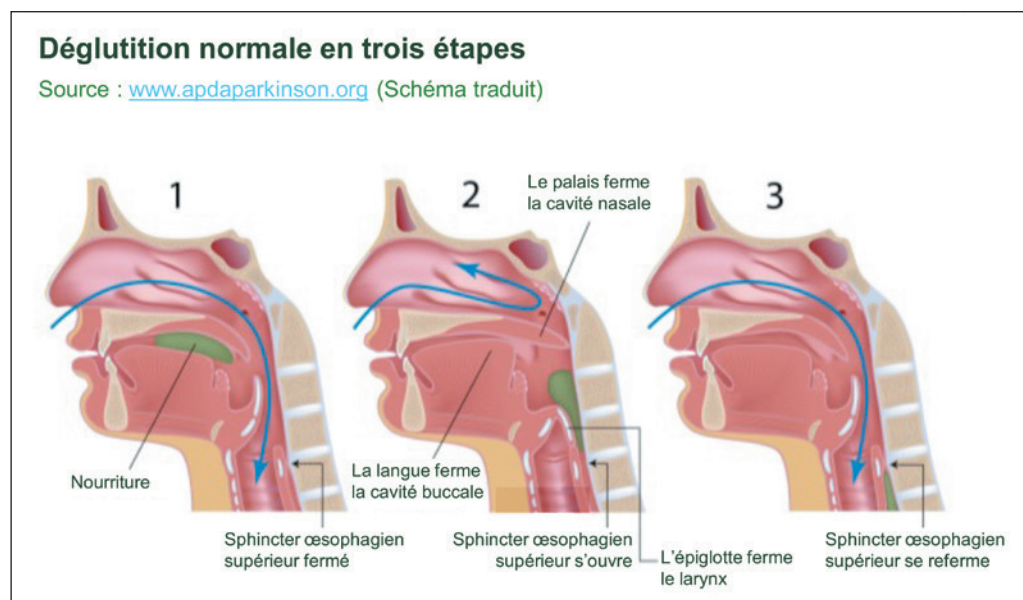


Figure 2

Schématisation d'un processus normal de déglutition.

Source : www.apdaparkinson.org (schéma traduit).

d'une fausse route – c'est-à-dire d'une aspiration du bolus alimentaire dans les voies respiratoires –, il s'agit la plupart du temps d'une expérience isolée ayant entraîné une toux pour éjecter les aliments qui n'ont pas pris la bonne direction. La dysphagie est un trouble récurrent de la déglutition : il s'agit d'un dysfonctionnement quotidien dans les différentes étapes présentées précédemment. D'après l'Organisation Mondiale de la Gastroentérologie⁷, 1 personne sur 17 souffrira de dysphagie au cours de sa vie. De multiples raisons peuvent expliquer des problèmes de dysphagie, en particulier une perte de tonus musculaire (au niveau de la langue, du sphincter œsophagien, etc.) et/ou de sensibilité induisant un délai dans le réflexe de déglutition.

La dysphagie accroît significativement le risque de problèmes de santé, le plus souvent sur des sujets déjà fragilisés. Le risque le plus évident et le plus important est le risque d'aspiration ou de fausses routes qui peut entraîner des infections pulmonaires et/ou potentiellement un étouffement et ainsi, dans les cas extrêmes, le décès.

Chaque bouchée devenant une épreuve, les patients peuvent aussi souffrir d'un stress psychologique et social, ce qui peut entraîner une perte d'appétit, une forte appréhension des repas, et quelquefois un refus de s'alimenter. Le patient se retrouve alors dans un cercle vicieux car il s'expose à une situation de

malnutrition et déshydratation : perte de poids, perte musculaire, affaiblissement du système immunitaire, fragilisation globale de l'organisme et augmentation des traitements médicamenteux renforcent alors encore plus le trouble de dysphagie.

La prise en charge des patients devient ainsi vitale, mais aussi particulièrement chronophage et coûteuse. Il est donc nécessaire de trouver des solutions concrètes, notamment alimentaires, pour améliorer la qualité de vie des patients.

3 La dysphagie : traitements et solutions

La dysphagie peut résulter de maladies neurologiques⁸, de cancers, etc. Traiter la source du problème permet d'atténuer, voire de traiter totalement la dysphagie. Cependant, dans de nombreux cas, la rééducation et les massages visant à augmenter le tonus musculaire et à améliorer la coordination des muscles seront nécessaires afin d'améliorer de manière significative la fonction de déglutition.

Dans le cas d'une dysphagie persistante, une adaptation du régime alimentaire avec une sélection d'aliments enrichis permet d'optimiser l'hydratation et l'apport nutritionnel afin de ne pas fragiliser le patient. Ces aliments, en plus de répondre à des besoins nutritionnels, doivent être facilement consommables.

7. Spécialité médicale qui étudie le système digestif et ses maladies.

8. Maladie ou dysfonctionnement du système nerveux central ou périphérique.

De nombreuses recherches se sont intéressées au réflexe de déglutition et aux manières de le favoriser⁹. Plusieurs aspects semblent importants :

- la température de l'aliment ou de la boisson ainsi que les sensations de chaud ou de froid ont tendance à accélérer le réflexe de déglutition ;
- le goût, et en particulier la perception épicée et piquante, favoriserait le réflexe de déglutition. Il faut cependant noter que, pour beaucoup de patients, la perception du goût peut aussi être affectée, ce qui peut limiter cette approche ;
- enfin, la texture des aliments est un élément clé facilitant la déglutition.

Les aliments trop fluides, comme les boissons ou les soupes, nécessitent un réflexe de déglutition rapide et peuvent poser des problèmes d'aspiration ; d'un autre côté, les aliments trop durs peuvent poser des problèmes de mastication¹⁰ et, lors d'une fausse

route, d'un complet blocage des voies respiratoires. De plus, les aliments secs sont à proscrire car ils nécessitent une salivation efficace et un effort supplémentaire lors de la déglutition. Dans ce contexte, les aliments à texture modifiée prennent tout leur sens, en offrant des solutions concrètes pour adapter les repas aux besoins spécifiques des personnes souffrant de dysphagie.

4 Les texturants pour une meilleure prise en charge de la dysphagie

Les texturants sont des additifs qui modifient les propriétés physiques d'un aliment sans en modifier significativement la saveur. Les texturants sont utilisés depuis des dizaines, des centaines, voire des milliers d'années pour certains. Ils sont le plus souvent extraits de graines, de fruits, d'algues, ou bien obtenus par des champignons ou des bactéries. Parmi les applications alimentaires classiques, il est possible de souligner l'utilisation du xanthane¹¹ dans les sauces, du carraghénane¹² dans les produits laitiers et de la pectine¹³ dans les confiseries ou les confitures.

Compte tenu de l'importance de la texture des aliments pour les personnes souffrant de dysphagie, les texturants apparaissent comme des alliés

9. Ebihara T., Sekizawa K., Nakazawa H., Sasaki H., *Lancet*, 341 [8842], 432 [1993] ; Warando A., Ebihara S., Ebihara T., Okazaki T., Takahashi H., Asada M., Sasaki H., *J Am Geriatr Soc.*, 52 [12], 2143-2144 [2004] ; Ebihara T., Ebihara S., Watando A., Okazaki T., Asada M., Ohru T., Yamaya M., Arai H., *Br J Clin Pharmacol.*, 62 [3], 369-371 [2006] ; Newman R., Vilardell N., Clavé P., Speyer R., *Dysphagia*, 31 [2], 232-249 [2016] ; Ebihara S., *Toho J Med.*, 5 [2], 33-39 [2019] ; Nishinari K., *21st Gums & Stabilizers for the Food Industry Conference* (2020) ; Ebihara S., Naito T., *Tahaku J Exp Med.*, 256, 1-17 [2022].

10. Action de broyer des aliments à l'aide des dents, considérée comme la première étape de la digestion.

11. Obtenu par fermentation/culture de la bactérie *Xanthomonas campestris*.

12. Obtenu à partir d'algues rouges.

13. Obtenue à partir d'écorces de fruits, majoritairement d'agrumes ou de pommes.

essentiels dans la prise en charge des patients.

En 2013, une initiative a été lancée afin d'établir une standardisation internationale des textures adaptées aux troubles de la dysphagie appelée IDDSI (*Figure 3*). Un continuum de huit niveaux a ainsi été défini sous la forme de deux pyramides inversées, chaque niveau s'accompagnant d'une description précise de la texture ainsi que d'exemples concrets permettant une meilleure illustration. Ainsi, une boisson très fluide (niveau 0) aura un indice qui augmentera progressivement au fur et à mesure qu'elle sera épaissie. À l'inverse, un aliment solide (niveau 7) verra

son indice diminuer lorsqu'il sera mixé, par exemple. Pour les indices intermédiaires, il y a une superposition entre les boissons qui deviennent de plus en plus épaissies/visqueuses et les aliments solides qui peuvent être hachés au point de s'écouler. Il est intéressant de noter la notion de lubrification sur l'indice 5. La lubrification permet de faciliter la déglutition en réduisant les frottements, ce que permet l'utilisation de texturants. Cependant, tous les texturants ne se valent pas : leur sélection dépend de nombreux paramètres qu'il convient d'examiner.

5 Le choix du système texturant

Il existe de nombreux texturants sur le marché et il n'est pas toujours facile d'appréhender les raisons de l'utilisation d'un texturant plutôt qu'un autre. À l'image des applications alimentaires classiques, le choix d'un texturant se base sur trois piliers :

- La texture finale recherchée. Certains texturants permettent d'épaissir des solutions (c'est-à-dire d'augmenter leur viscosité) sans toutefois obtenir un gel à proprement parler ; à l'inverse, d'autres vont gélifier facilement le produit alimentaire (en d'autres termes, le rendre solide). Il est aussi important que la texture reste stable dans le temps, d'autant plus que la prise de repas peut être très longue.

- Le milieu alimentaire à texturer. En fonction de la température de l'aliment (ex. : boisson chaude), de l'acidité du milieu (ex. : jus de fruits) ou de la

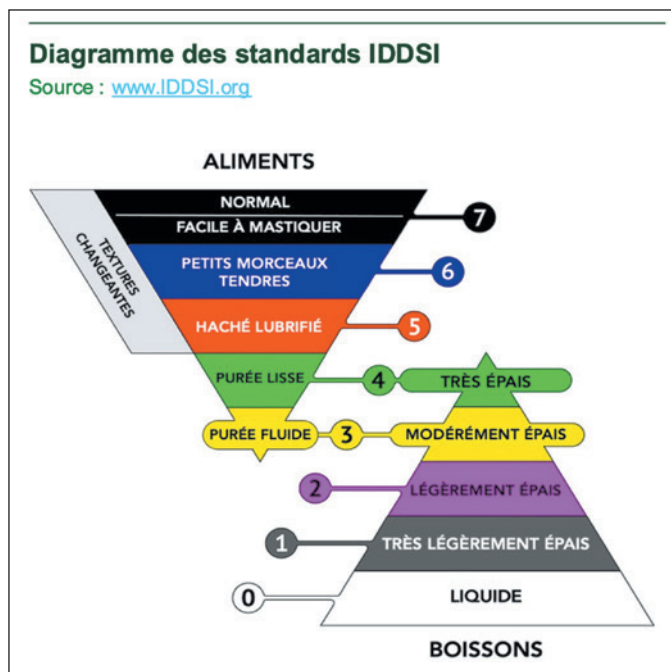


Figure 3

Standardisation internationale des textures adaptées à la dysphagie.

Source : www.IDDSI.org.

présence d'autres composés (ex. : enrichi en protéines, en sel, en sucre, etc.), le texturant le plus pertinent sera différent. Certains texturants sont incompatibles avec des milieux spécifiques.

– Enfin, l'usage. Si certains texturants sont très efficaces pour modifier l'aspect d'un aliment, ils nécessitent cependant une activation spécifique : un chauffage, une agitation puissante, etc. Si cela ne pose pas de problème pour une société de l'agroalimentaire produisant, par exemple, des crèmes desserts sur une ligne de production, cela peut s'avérer plus problématique dans la vie de tous les jours. Dans le cas de personnel médical à l'hôpital, à l'EHPAD¹⁴ ou à domicile n'ayant à disposition qu'un fouet ou une fourchette, il est nécessaire d'avoir un texturant, peut-être moins

14. Établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes.

efficace, mais facilement dispersable¹⁵ et/ou soluble¹⁶ et stable.

Cette approche s'illustre à travers des produits commerciaux déjà existants sur le marché. La **figure 4** présente trois exemples développés par Nestlé Health Science¹⁷ :

– Le premier exemple est une poudre instantanée disponible sous forme de pot avec une mesurette ou en sachet individuel. Pour texturer 200 ml d'eau, de jus, de thé ou de café,

15. Qualifie des produits solides dont les éléments se dispersent facilement dans l'eau ou un autre liquide.

16. Qui peut se dissoudre (dans un liquide).

17. Le type de texturant utilisé dans chaque produit est une information publique, figurant sur la liste des ingrédients. Même si Nestlé est un client important de Cargill, les ingrédients des produits Nestlé ici présentés ne sont pas nécessairement fournis ou exclusivement fournis par Cargill.

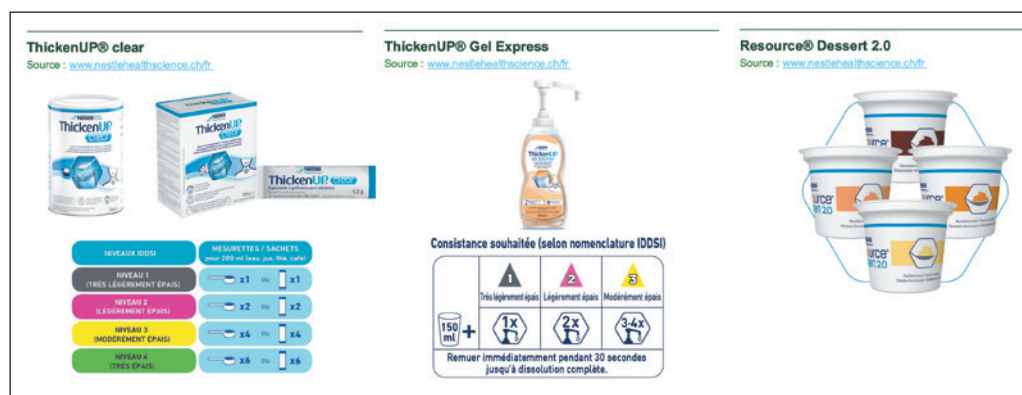


Figure 4

3 exemples de produits commercialement disponibles pour lutter contre la dysphagie. De gauche à droite : une poudre instantanée (ThickenUP® Clear), une préparation texturée (ThickenUP® Gel Express) et un aliment enrichi (Resource® Dessert 2.0).

un nombre de dosettes ou de mesurettes est recommandé pour atteindre la texture souhaitée. Dans ce cas, le texturant utilisé est du xanthane. L'avantage de ce texturant est qu'il peut être ajouté à la boisson sans apporter de goût, de couleur ou d'odeur supplémentaire. Son utilisation est très simple : après avoir ajouté la poudre, il faut remuer doucement la solution pendant 30 secondes. Dans ce cas, le point critique est que la poudre soit facilement et rapidement soluble.

– Le deuxième exemple est une préparation hypertexturée avec un distributeur. Il s'agit d'un système proche du précédent exemple. Cependant, au lieu d'ajouter une poudre dans une boisson, il s'agit ici d'une solution riche en texturant à ajouter *via* un distributeur doseur et qui n'apportera ni goût, ni odeur, ni couleur supplémentaire. En fonction de la texture désirée, il faudra ajouter plus

ou moins de doses. La difficulté de ce type de format est un défi technologique : l'utilisation d'un distributeur doseur. En effet, la solution doit être très riche en texturant. Cependant, elle doit rester pompable afin de pouvoir utiliser le distributeur doseur. Ici, une combinaison de xanthane et de gomme arabique est utilisée.

– Le dernier exemple se rapproche des aliments largement répandus dans le commerce traditionnel. Il s'agit d'un dessert avec la consistance d'un flan, hyperénergétique et enrichi en protéines. Ce «superaliment» a été enrichi afin de répondre aux besoins des populations qui souffrent de malnutrition. Les texturants utilisés sont le carraghénane et l'amidon modifié.

Ces éléments permettent de mieux comprendre comment la science des texturants peut répondre à des enjeux de santé publique, en particulier pour les populations âgées.

Conclusion

La dysphagie, trouble fréquent mais souvent méconnu, représente un défi majeur de santé publique dans une société où la population des seniors ne cesse d'augmenter. En plus d'une compréhension approfondie des mécanismes de la déglutition et des besoins nutritionnels spécifiques des seniors, les texturants offrent une solution concrète pour améliorer la qualité de vie des patients souffrant de dysphagie en garantissant une alimentation sûre, agréable et nutritive.

À travers l'utilisation judicieuse de texturants tels que le xanthane, le carraghénane ou la gomme arabique, il est possible d'adapter précisément la texture des aliments aux besoins spécifiques des personnes âgées souffrant de dysphagie. Les avancées récentes, telles que la standardisation internationale IDDSI, permettent une meilleure compréhension et une uniformisation des pratiques, facilitant ainsi leur mise en œuvre dans différents contextes, que ce soit en milieu hospitalier, en établissement spécialisé ou à domicile.

Au-delà de leur rôle fonctionnel, les texturants illustrent parfaitement comment la chimie et la physicochimie¹⁸ des aliments peuvent répondre à des problématiques humaines concrètes, rappelant que la compréhension approfondie des interactions au sein des aliments est indispensable et permet de concevoir concrètement des produits adaptés, sûrs et nutritifs.

18. Ensemble des caractéristiques physiques et chimiques d'une substance.

La sécurité sanitaire des aliments

Georges Kass, Luxembourgeois, est un vrai Européen : après des études supérieures en Grande-Bretagne, il est parti comme doctorant au Karolinska Institute¹, en Suède, et après quinze années comme professeur de toxicologie en Grande-Bretagne, il travaille aujourd'hui à l'EFSA², à Parme³. M. Kass va nous présenter l'aspect réglementaire de la sécurité sanitaire des aliments.

1 Présentation de l'EFSA

1.1. Présentation du sujet

En Europe s'élabore la législation qui encadre les innovations relatives aux aliments pour éviter tout danger pour le consommateur (**Figure 1**). C'est, plus précisément, le rôle de l'EFSA.

1.2. L'EFSA : son rôle et sa mission

L'EFSA est l'une des agences décentralisées de l'Union européenne, chargée des relations entre substances chimiques et microbiologiques et santé des habitants. Son siège général se trouve à Parme, en Italie (**Figure 2**). L'EFSA interagit avec d'autres agences, parmi lesquelles : l'EMA⁴, située aux Pays-Bas et chargée des médicaments ; l'ECHA⁵, à Helsinki, en

1. Institut Karolinska, Université médicale, basée à Stockholm, en Suède.

2. European Food Safety Authority = Autorité européenne de sécurité des aliments.

3. Ville du nord de l'Italie.

4. European Medicines Agency = Agence européenne des médicaments.

5. European Chemicals Agency = Agence européenne des produits chimiques.



Figure 1

Page introductive du sujet de la conférence.

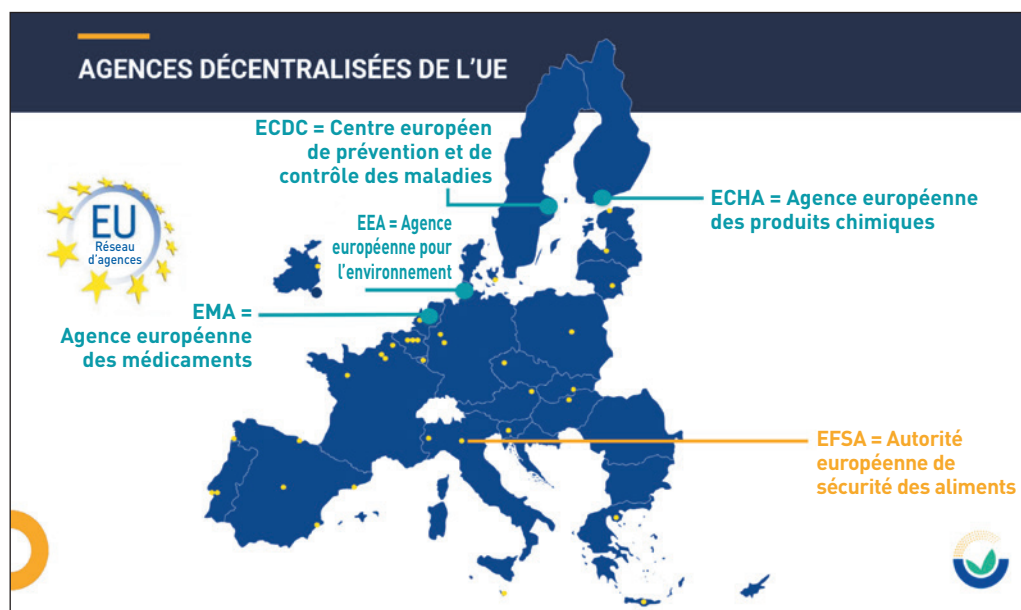


Figure 2

Carte présentant les agences décentralisées de l'Union européenne.

Finlande, qui évalue la dangerosité des actifs chimiques, pour s'assurer que leur utilisation est sans danger. Toutes ces agences font en sorte que la consommation des aliments et des médicaments soit sûre («safe⁶») pour les citoyens.

L'EFSA a été créée en 2002, à la suite d'une série de crises alimentaires : la «vache folle⁷» entre 1986 et les années 2000, la crise de la dioxine⁸ au printemps 1999 en Belgique, où 500 t d'aliments données entre

autres aux volailles et cochons contenaient 50 kg de PCB et 1 g de dioxines. Il fallait d'une part restaurer la confiance dans la chaîne alimentaire dans l'Union européenne, tout en l'améliorant, et d'autre part contribuer à un niveau élevé de protection des consommateurs.

Un aspect très fondamental en Europe qui nous différencie d'autres agences en dehors de l'Union européenne est la séparation des fonctions «évaluation des risques» et «gestion des risques». L'EFSA est strictement chargée de l'évaluation des risques tandis que la Commission européenne⁹ s'occupe de la gestion des risques (**Figure 3**).

L'EFSA compte actuellement près de 600 employés ainsi que des experts externes. Ses publications (environ 10 000 depuis 2003) sont accessibles

6. «Sans danger».

7. Encéphalopathie spongiforme bovine (ESB), une maladie progressive, dégénérative et mortelle qui détruit peu à peu le système nerveux central des bovins.

8. Nom donné au scandale alimentaire, au printemps 1999, lié à la découverte de dioxines (polychlorodibenzo-p-dioxines ou PCDD, composés aromatiques tricycliques chlorés) et de polychlorobiphényles (PCB) dans des farines animales en Belgique, utilisées pour l'alimentation des poulets, entre autres.

9. Organisation représentant l'Union européenne sur la scène internationale.



Figure 3

Les missions de l'EFSA.

sur son site Internet¹⁰ (**Figure 4**).

L'EFSA apporte des conseils scientifiques indépendants et un soutien aux gestionnaires des risques en matière de sécurité des aliments. Elle fournit aussi la communication en diffusant rapidement les résultats de ses travaux. Elle favorise par ailleurs la coopération scientifique avec beaucoup d'instituts, européens et en dehors de l'Europe – instituts de recherche ou instituts d'évaluation du risque (**Figure 5**). En revanche, l'EFSA n'est pas responsable des lois et des politiques concernant la sécurité des aliments, ni des autorisations de commercialisation (c'est le gestionnaire des risques qui a cette responsabilité), ni même de la gestion de la fraude, i.e. le fait que la

législation soit respectée ou non n'est pas de la responsabilité de l'EFSA (**Figure 6**).

1.3. Le fonctionnement de l'EFSA

Pour se saisir d'une question, l'EFSA a besoin d'un « mandat ». Celui-ci vient soit de la Commission européenne (c'est le cas pour la plupart des mandats), soit du Parlement européen¹¹, soit des États membres¹² ou même d'un auto-mandat, où l'EFSA lance son propre mandat, par exemple pour améliorer une

11. Une des sept institutions de l'Union européenne. Il s'agit de l'assemblée législative directement élue de l'Union.

12. Pays qui appartiennent à une organisation politique, économique ou commerciale telle que l'Union européenne.

10. <https://www.efsa.europa.eu/en>



Figure 4

L'activité de l'EFSA en quelques chiffres clés.



Figure 5
Liste des actions menées par l'EFSA.

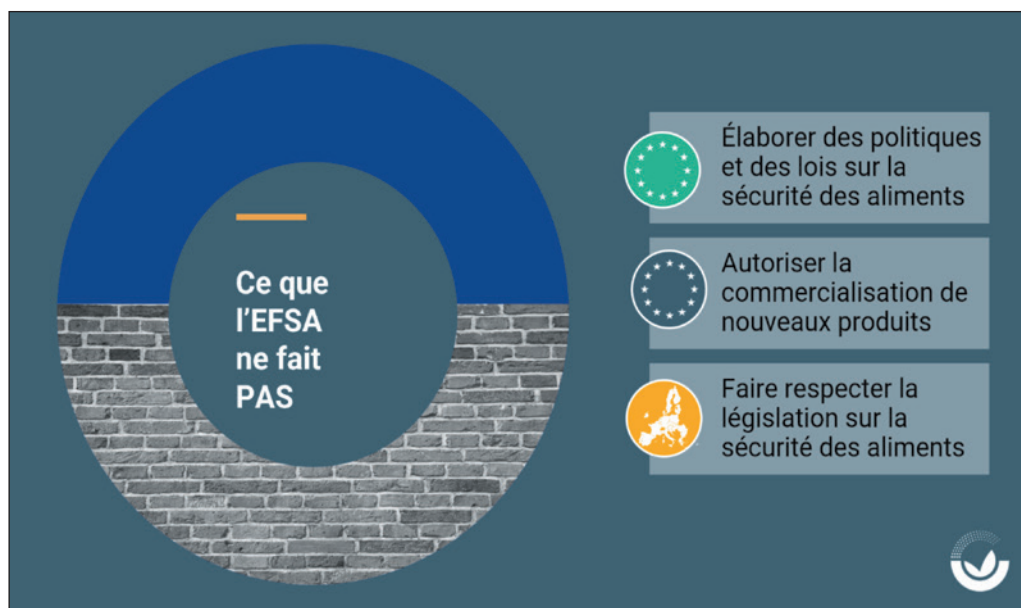


Figure 6
Liste des actions non autorisées pour l'EFSA.

procédure pour l'évaluation des risques (**Figure 7**).

Dès que le mandat est reçu, on doit d'abord préciser la formulation du problème : de quoi s'agit-il ? On établit ensuite un protocole pour construire un programme de travail. Pour cela, les données dont on a besoin sont collectées et évaluées au niveau de leur qualité. Finalement, on fait la synthèse des données pour l'analyse finale. Ensuite, on publie les résultats des travaux (**Figure 7**).

La **figure 8** donne une liste typique de mandats que l'on reçoit assez régulièrement. Parfois, il y a certaines situations résultant d'une sorte de crise au niveau européen ; il faut donc que l'on intervienne. Dans ces cas, l'EFSA reçoit un mandat de demande de travaux.

Chaque année, des demandes arrivent de cette façon : ce sont des demandes urgentes d'avis scientifiques. Les questions sont souvent un mélange entre des problématiques chimiques et des problématiques microbiologiques¹³, comme la dermatose nodulaire contagieuse¹⁴, la grippe aviaire¹⁵, la

13. Partie de la biologie qui étudie les organismes microscopiques animaux, végétaux et bactériens.

14. Maladie virale qui touche principalement les bovins, qui se manifeste par l'apparition de nodules (petites bosses dures) sur la peau, accompagnés de fièvre et de gonflements, et se propage par les piqûres d'insectes et le contact entre animaux.

15. Infection virale hautement contagieuse des oiseaux sauvages et domestiques, y compris d'élevage.

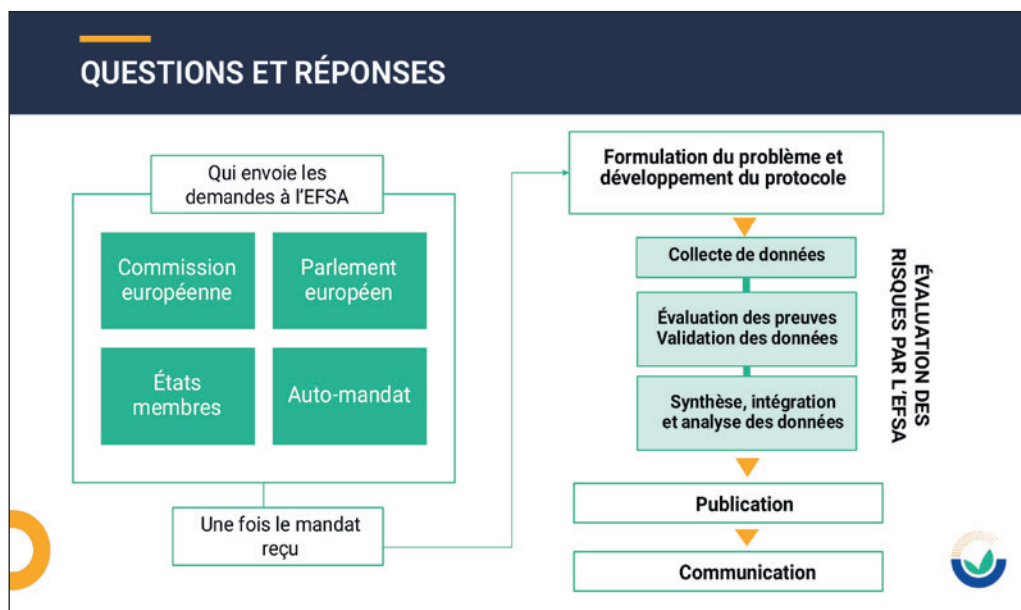


Figure 7

Schéma du fonctionnement de l'EFSA.

salmonellose¹⁶ ou la *Listeria*¹⁷. Un exemple récent est la présence d'oxyde d'éthylène¹⁸ dans des graines de sésame (Figure 8).

2 Connaître la non-dangerosité d'un aliment

2.1. Le cadre juridique

16. Bactérie pouvant causer des infections alimentaires, provoquant diarrhée, fièvre et maux de ventre.

17. Bactérie pouvant contaminer les aliments et causer la listériose, une infection grave, surtout chez les personnes fragiles.

18. Oxyde d'éthylène, gaz incolore, de formule chimique C₂H₄O, hautement inflammable et très réactif, à l'odeur agréable, qui tue les bactéries, les virus et les champignons.

Une question récurrente dans nos mandats est : Comment sait-on qu'une substance, un additif ou un arôme que l'on met dans l'alimentation est sans danger pour le consommateur ?

Pour répondre, il y a la législation européenne, qui est constituée de la législation alimentaire générale de 2002

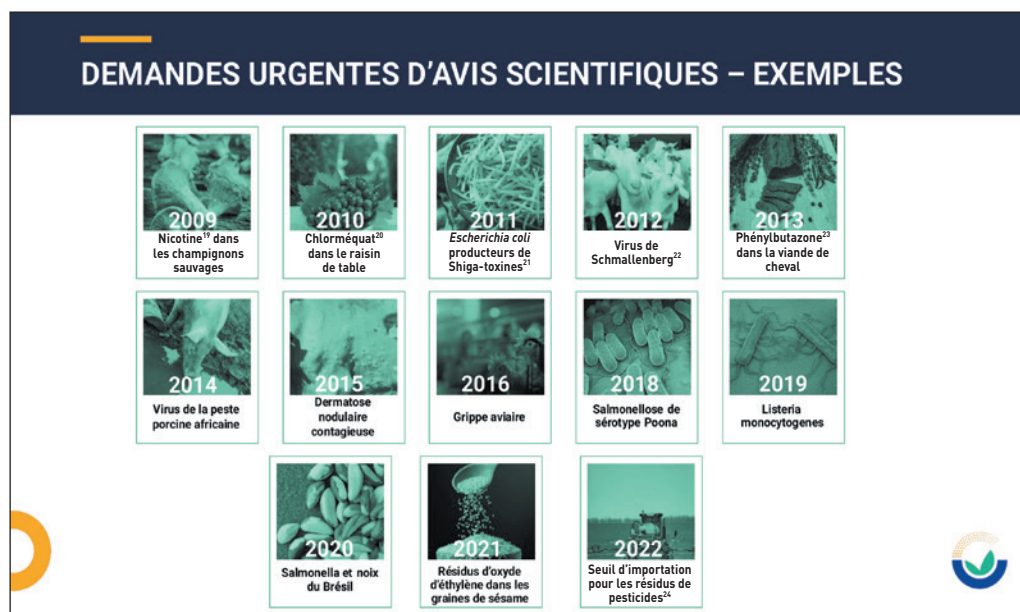


Figure 8

Exemples de mandats reçus par l'EFSA.

19. Alcaloïde (substance organique d'origine végétale, contenant au moins un atome d'azote dans la molécule) du tabac.

20. Régulateur de croissance destiné à un usage professionnel en agriculture.

21. Agents pathogènes responsables d'infections humaines aux manifestations cliniques variées.

22. Maladie d'élevage qui peut se manifester par de la fièvre, une chute de production ou des malformations à la naissance, en particulier chez les ovins.

23. Anti-inflammatoire non stéroïdien (AINS).

24. Produit chimique employé contre les parasites animaux et végétaux des cultures.

(Règlement (CE) n° 178/2002, qui traite de toute la sûreté de l'alimentation au niveau européen, et des législations alimentaires sectorielles de l'UE) (**Figure 10**). Chaque secteur – que ce soient les arômes, les additifs, les enzymes²⁵, les pesticides, la nourriture pour bébé ou les vitamines – possède des législations qui prennent tout en compte au niveau européen.

2.2. L'EFSA en matière de sécurité des aliments

Pour assurer la sécurité des aliments dans l'Union européenne, l'EFSA réalise deux tâches : l'évaluation du

risque et la communication sur les risques, la gestion du risque étant faite à Bruxelles par les gestionnaires, *i.e.* la Commission. Cela représente les différents secteurs d'activité déployés pour la sécurité alimentaire (**Figure 11**).

Parmi les domaines d'activité de l'EFSA (**Figure 12**) figure le travail sur les plantes et leur santé en Europe, leur protection contre les parasites et autres infestations, les organismes génétiquement modifiés (OGM). Une deuxième préoccupation est relative aux animaux : leur alimentation, leur santé et leur bien-être. On doit aussi déterminer les dangers biologiques issus de zoonoses et les dangers chimiques dus aux contaminants chimiques (par définition, toute substance non ajoutée intentionnellement dans la

25. Protéines (substances organiques produites par des cellules vivantes) qui accélèrent les changements chimiques.

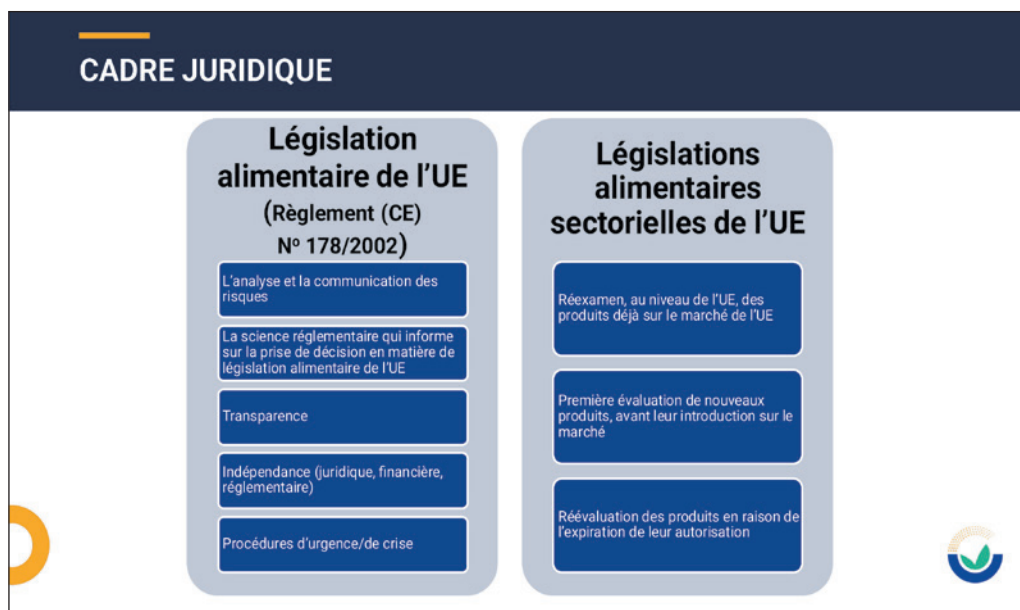


Figure 9

Le rôle de la législation alimentaire.

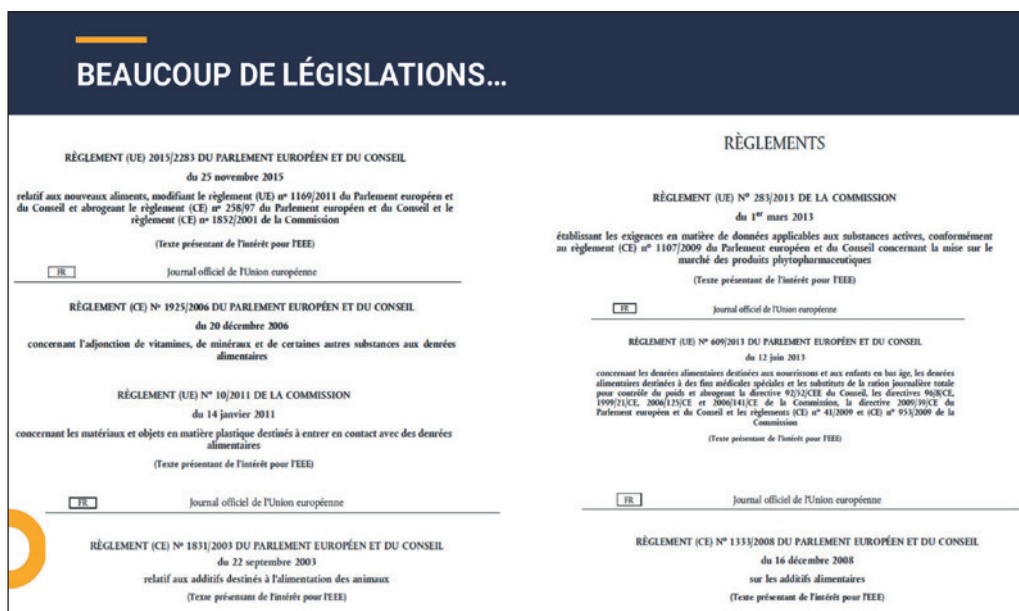


Figure 10

Exemples de législations sectorielles reçues par l'EFSA.

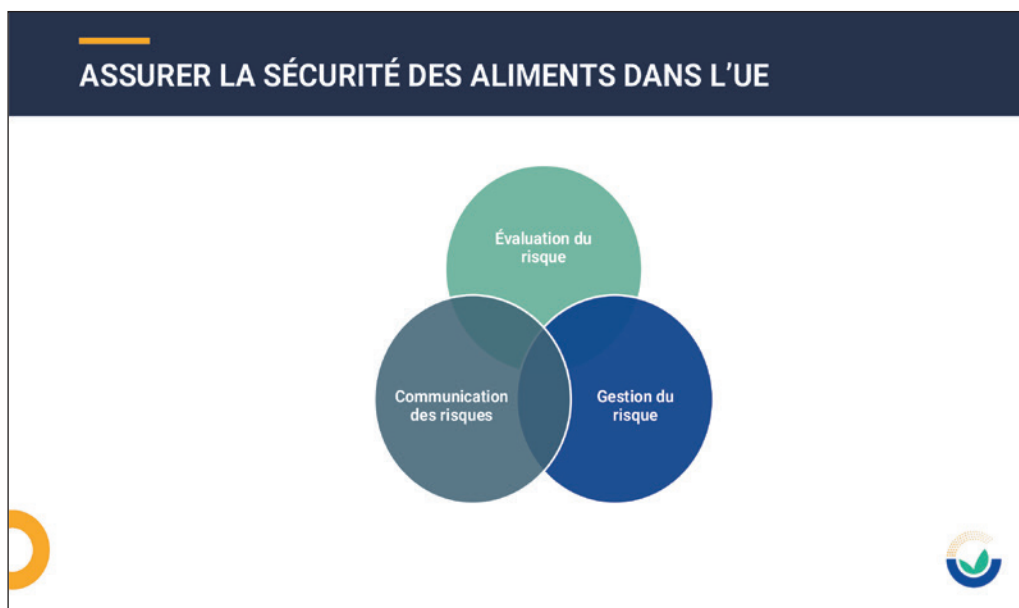


Figure 11

Diagramme représentant les secteurs d'activité de l'EFSA.



Figure 12

Représentation schématique des sujets d'étude de l'EFSA.

nourriture), et les substances ajoutées, comme les additifs alimentaires, ou les substances utilisées pour protéger les aliments, comme les emballages.

L'EFSA se préoccupe également de la nutrition en définissant les doses à recommander concernant les vitamines, les oligominéraux²⁶ ou encore les macronutriments²⁷ (sucres, graisses). Dans ce domaine, on a aussi les nouveaux aliments et les allégations nutritionnelles et de santé portant

sur les denrées alimentaires. Chacun des cercles de la **figure 12** représente un panel scientifique auquel tous les spécialistes peuvent adresser des questions dans leur secteur. On a figuré en rouge tous les secteurs où l'on s'occupe des produits chimiques et, comme on le voit, cela constitue vraiment la majorité.

Les substances chimiques concernées (**Figure 12**) peuvent être des produits réglementés (pour lesquels une société industrielle – un demandeur – nous envoie un dossier qui permet de justifier ou non que la substance est « sûre » (« safe »)). Cette démarche s'applique aux produits qui ne sont pas encore commercialisés et que l'on évalue avant qu'ils ne soient autorisés sur le marché de l'UE.

26. Minéraux présents en très petites quantités dans l'organisme, mais essentiels pour de nombreuses fonctions biologiques. Exemples : fer, zinc, cuivre, sélénium, iode.

27. Nutriments nécessaires en grande quantité pour fournir de l'énergie et assurer le bon fonctionnement de l'organisme (glucides, lipides et protéines).

Il y a aussi les réévaluations périodiques, comme dans le cas des pesticides en Europe. Dans le cas des contaminants, en général, il n'y a pas de producteur commercial spécifique et, par conséquent, pas de dossier ; on doit alors aller chercher l'information et les données pour l'évaluation des risques posés par ce type de produit chimique.

2.3. Données nécessaires pour caractériser les substances

Présentons maintenant, à titre d'illustration, la façon dont se fait l'analyse du risque, ainsi que les différentes procédures et étapes importantes, mais aussi les données préalables importantes pour ce travail.

L'aspect chimique est évidemment primordial. Nous

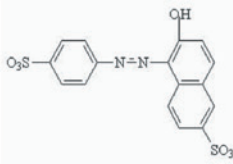
devons en effet avoir toutes les informations du demandeur (**Figure 13**) : l'identité de la substance, le nom, le numéro CAS²⁸ du produit, les synonymes, la formule moléculaire²⁹, la structure, etc. Le plus important est de savoir s'il s'agit d'un composé unique ou d'un mélange de produits (parfois, ce n'est pas très clair) et également de connaître la présence d'isomères qui peuvent avoir des différences de propriétés biologiques aussi bien que toxicologiques.

28. Numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données du Chemical Abstracts Service.

29. Formule indiquant la nature et le nombre de chacun des atomes d'une molécule, en accord avec la masse moléculaire effective, mais sans présumer du mode d'association de ces atomes.

TYPES DE DONNÉES : 1. LA CHIMIE

- ☒ **Identité**
 - Nom, n° CAS, synonymes, formule moléculaire et structurale
 - Composé unique ou mélange ?
 - Isomères
- ☒ **Propriétés physico-chimiques**
 - Poids moléculaire, taille des particules (nanoparticules !), lipophilie, apparence, solubilité, constantes d'ionisation, etc. et spécifications
- ☒ **Pureté**
 - Pureté chimique, impuretés (quantités !), contaminants (quantités !)
 - Produits de dégradation
 - Produit commercial vs produit d'essai



Jaune soleil FCF(E110)

Figure 13

Caractéristiques chimiques des substances requises pour l'analyse du risque.

Il est aussi important que nous connaissions les propriétés physicochimiques³⁰ de ces substances (**Figure 13**), à commencer par des informations de base comme le poids moléculaire³¹. Les informations sur la taille des particules sont particulièrement critiques s'il s'agit de nanoparticules³². Souvent, la substance elle-même n'est pas une substance nano³³, mais il y a parfois une contamination par des particules de taille nano qui accompagnent la substance. Or, on sait que les propriétés chimiques, biologiques et toxicologiques peuvent être complètement différentes quand on entre dans le domaine nano.

D'autres informations (**Figure 13**) – lipophilie³⁴, apparence, solubilité³⁵ – sont également importantes comme les spécifications d'usage, c'est-à-dire la nature des impuretés qui peuvent accompagner les substances et modifier leurs propriétés, voire leur toxicité.

Naturellement, il faut savoir comment une substance introduite dans l'aliment peut se

dégrader (**Figure 13**). La substance chimique fournie par l'industriel entre dans l'aliment, puis dans le supermarché et chez le consommateur, avant de se retrouver sur le plat et d'être consommée. Comment tout ce processus modifie-t-il la substance originelle ? Il faut disposer de toutes ces informations (**Figure 13**), non seulement sur le produit de base, mais aussi sur les éventuels produits de sa dégradation, dont il faut aussi connaître la toxicité.

Ensuite, ce qui est aussi important pour nous, c'est de s'assurer que le produit commercial est bien celui qui a été utilisé pour les études. On ne peut pas avoir une situation où un producteur nous envoie des études, faites sur un animal, avec une substance chimique ultrapure (99,9 %), tandis que le producteur veut mettre la même substance sur le marché avec seulement 80 % de pureté.

Quels types de données biologiques et toxicologiques demande-t-on ? (**Figure 14**)

D'abord, il y a ce qu'on appelle les « données ADME³⁶ » pour connaître le degré d'absorption de la substance par le corps, savoir comment elle se diffuse dans les différents tissus et organes, comment elle est métabolisée³⁷ puis éliminée du corps. Puis des études toxicologiques avec des études dans un organisme vivant (*in vivo*) sont faites sur les animaux (surtout rats et lapins), de 28 jours (études subaiguës) et de 90 jours (études

30. Ensemble des caractéristiques physiques et chimiques d'une substance.

31. Somme des masses des atomes composant une molécule.

32. Molécules dont la taille varie entre 1 et 100 nanomètres, également appelées « particules ultrafines » (PUF).

33. De l'ordre du nanomètre.

34. Capacité d'une substance à se mélanger avec les graisses plutôt qu'avec l'eau. Plus une substance est lipophile, plus elle se dissout facilement dans les huiles et les corps gras.

35. Capacité d'une substance à se dissoudre dans un liquide, comme le sucre qui se mélange dans l'eau.

36. Absorption, Distribution, Métabolisme et Excrétion.

37. Transformée par le corps en d'autres composés afin de faciliter son élimination.

subchroniques). On doit aussi faire des études de longue durée (1 ou 2 ans) (études chroniques) et, bien évidemment, sur la cancérogénicité³⁸. Il faut aussi connaître l'interaction entre la substance et le matériel génétique pour être sûr qu'il n'y ait pas de risques de mutations³⁹, de lésions chromosomiques⁴⁰, ni de dommages au niveau de la fertilité et du développement. Parfois, il est nécessaire de demander

des études complémentaires spéciales, comme des études de neurotoxicité⁴¹ ou d'immunotoxicité⁴². Par exemple, si un insecticide attaque le système nerveux d'un insecte, l'évaluateur du risque doit être certain que ce type de toxicité ne se manifeste pas également chez l'être humain.

2.4. Les méthodes *in silico* en l'absence de données *in vivo*

Lorsque l'on ne dispose pas de données directes sur la substance à caractériser

38. Capacité d'une substance à provoquer ou favoriser l'apparition d'un cancer.

39. Modification de l'information génétique (séquence d'ADN ou d'ARN) dans le génome pouvant entraîner des changements dans les caractéristiques d'un organisme.

40. Altération d'un chromosome, comme une perte, un ajout ou une réorganisation de son matériel génétique, pouvant entraîner des maladies ou des anomalies.

41. Effet toxique d'une substance sur le système nerveux, pouvant entraîner des troubles comme des pertes de mémoire, des tremblements ou des paralysies.

42. Effet nocif d'une substance sur le système immunitaire, pouvant l'affaiblir, le dérégler ou provoquer des réactions excessives.

TYPES DE DONNÉES : 2. DONNÉES D'ESSAIS BIOLOGIQUES

- ☐ ADME – absorption, distribution, métabolisme et excrétion (toxicocinétique)
- ☐ Études *in vivo* subaiguës (de 28 jours) et subchroniques (de 90 jours)
- ☐ Études *in vivo* de toxicité chronique (de 1-2 ans) et de cancérogénicité (de 2 ans)
- ☐ Études de toxicité génétique: mutations et lésions chromosomiques
- ☐ Fertilité, développement, parturition et développement postnatal
- ☐ Études spéciales (neurotoxicité, immunotoxicité, etc.)

Figure 14

Données d'essais biologiques requises pour l'analyse du risque.

(Figure 15), on a recours à des méthodes dites *in silico*⁴³ qui peuvent prédire ses propriétés toxicologiques à partir de données sur des molécules similaires déjà connues, générées par ordinateur. À partir de la structure de la substance, l'évaluateur du risque peut prédire le potentiel toxicologique d'une substance pas encore caractérisée. Une telle méthode informatique s'appelle le « R(Q)SA » (Relations Quantitatives Structure-Activité) – plus souvent appelé « (Q)SAR », *Quantitative Structure-Activity Relationship*. Il y a aussi la méthode des références croisées, aussi

43. Techniques de simulation informatique utilisées pour modéliser et prédire des phénomènes biologiques ou chimiques, comme l'effet d'un médicament ou la toxicité d'une substance.

appelée le « *Read-Across* », désormais très fréquemment utilisée en toxicologie pour prédire les propriétés d'une substance en se basant sur les données existantes d'une substance chimique similaire.

3 Quantifier la non-dangerosité d'un aliment

3.1. Les méthodes d'intégration⁴⁴ des données

Comment faire pour tenir compte de toutes ces données dans la pratique, c'est-à-dire pour les « intégrer » ? (Figure 16) On commence par chercher s'il existe une dose

44. Consiste à rassembler, combiner et analyser des informations provenant de différentes sources ou formats pour en tirer des conclusions plus complètes et précises.

S'IL N'Y A PAS DE DONNÉES ANIMALES : MÉTHODES *IN SILICO*

❑ R(Q)SA (Relations Quantitatives Structure-Activité)

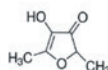
- L'hypothèse de base : des molécules similaires ont des activités similaires
- Modèles de régression ou de classification
- Activité = f (propriétés physicochimiques et/ou propriétés structurales) + erreur
- Le R(Q)SA peut prédire certains paramètres simples (par ex. : mutagenèse)

❑ Références croisées ou *Read-across*

- Approche non expérimentale : l'information sur une substance chimique (la substance chimique source) est utilisée pour prédire le même paramètre pour une autre substance chimique (la substance chimique cible)
- *In silico* ou par expertise
- Exemple : molécule A comme substance chimique source pour la molécule B (substance chimique cible)



Molécule B : goût caramel



Molécule A : goût fraise

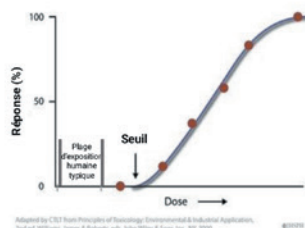
Figure 15

Les méthodes *in silico*, utilisées en l'absence de données *in vivo*.

INTÉGRATION DES DONNÉES

Quantitative

- Comprend des évaluations de la relation **dose-réponse**
- Identification d'un **seuil**.
- Traditionnellement, les approches à seuil sont appliquées aux paramètres **non cancérogènes** et les approches sans seuil aux paramètres du cancer et à la génotoxicité (**intégration qualitative**).



Seuil ou point de départ :

- Dose sans effet (DSE, *No Adverse Effect*, NOAEL)
- La *benchmark dose* (BMDL) ou dose repère



Figure 16

Les méthodes d'intégration des données collectées par l'EFSA.

seuil⁴⁵ en deçà de laquelle cette substance ne cause pas de toxicité chez l'animal. Pour ce faire, on a deux approches : 1) on cherche expérimentalement une dose sans effet ou 2) on fait une analyse mathématique de la courbe dose-réponse⁴⁶ et on repère la zone de changement de comportement – la dose repère ou « *benchmark dose*⁴⁷ ».

3.2. Les concepts de VTR et de DJA

Les conclusions de nos travaux se résument en recommandations pour les usagers. La

valeur toxicologique de référence, la VTR (Figure 17), est faite pour protéger le consommateur contre la toxicité de ce qu'il consomme. La DJA⁴⁸ (Figure 17), dose journalière admissible, indique dans le même esprit la dose maximale qui peut être consommée chaque jour sans causer de problème. La VTR est exprimée en milligrammes de substance par kilogramme de poids corporel et par jour ; elle s'applique ainsi à tout individu de la population. Le concept de DJA a été inventé par le professeur René Truhaut⁴⁹, membre de l'Académie des sciences et de l'Académie d'agriculture, et introduit pour la première fois en 1961

45. Valeur limite.

46. Courbe mathématique traduisant la relation entre la dose et la réponse à cette dose.

47. Dose d'une substance chimique à laquelle on observe un effet biologique mesurable, généralement défini comme un changement d'une certaine ampleur par rapport à un groupe témoin.

48. Dose journalière admissible ou acceptable.

49. Toxicologue et chercheur français, pionnier dans le domaine de la toxicologie alimentaire.

LE CONCEPT DE VALEUR TOXICOLOGIQUE DE RÉFÉRENCE (VTR)

- La VTR plus utilisée pour protéger le consommateur :
 - La dose journalière admissible ou acceptable ou **DJA** pour les seuls **produits réglementés** (en anglais : *Acceptable Daily Intake* ou ADI)
 - La dose journalière tolérable (**DJT**) pour les **contaminants naturels** (en anglais : *Tolerable Daily Intake* ou TDI)
- La DJA ou la DJT est la quantité d'une substance qu'un individu peut ingérer chaque jour, sans risque pour sa santé.
 - Elle est exprimée en **mg de substance par kg de poids corporel et par jour**. La consommation maximale est, de fait, beaucoup plus faible pour un enfant jeune que pour un individu adulte.
- Le concept de DJA a été inventé par le professeur René Truhaut, membre de l'Académie des sciences et de l'Académie d'agriculture.
- Il a été introduit pour la première fois en 1961 par le comité international mixte FAO - OMS d'experts sur les additifs alimentaires (JECFA ou Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives).

Figure 17

Les concepts de valeur toxicologique de référence (VTR) et de dose journalière acceptable (DJA) pour protéger le consommateur.

par le comité mixte FAO-OMS⁵⁰ : le JECFA⁵¹.

Naturellement, avec des données obtenues d'études faites sur le rat ou la souris, il faut considérer que l'être humain n'est pas un rat ou une souris géante. Pour assurer la

sécurité du consommateur, il faut appliquer des facteurs d'incertitude⁵² qui prennent en considération les différences de toxicocinétique et de toxicodynamique entre l'être humain et l'animal. Généralement, un facteur de 10 est utilisé pour les différences entre l'animal (où les données expérimentales ont été générées) et l'être humain (**Figure 18**) et de 10 pour les différences interindividuelles (intra-espèce⁵³) pour définir la DJA (**Figure 19**). La DJA est donc la dose sans effet divisée par 100 (10×10).

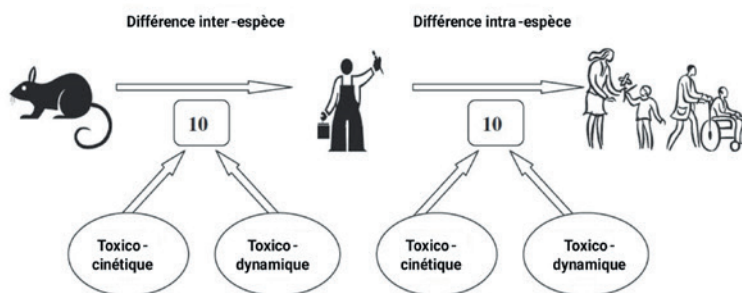
50. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture – Organisation Mondiale de la Santé.

51. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives : comité d'experts conjoint de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) et de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Ce comité évalue la sécurité des additifs alimentaires, des contaminants, des résidus de médicaments vétérinaires et d'autres substances présentes dans les aliments. Il émet des recommandations sur les niveaux sûrs de ces substances pour protéger la santé des consommateurs.

52. Coefficient utilisé pour tenir compte des inconnues ou des variables non mesurées lors de l'évaluation des risques.

53. Pour tenir compte des différences d'âge, de sexe et ethniques dans la population humaine.

INTÉGRATION DES DONNÉES : DU RAT À L'HOMME



Adapté de Schroder et al., Toxicology in Vitro 25 (2011), 589 –604.



Figure 18

Facteurs d'incertitudes prenant en compte les différences de toxicocinétique et de toxicodynamique entre l'être humain et l'animal (rat).

MODE DE FIXATION D'UNE DJA

Le processus de la fixation d'une DJA suit les étapes suivantes :

1. Identification de la **dose sans effet** (DSE, No Adverse Effect Level (NOAEL)) ou la **benchmark dose** (BMDL) ou **dose repère** la plus basse de toutes les études de toxicologie faites sur la substance.
2. Définition des facteurs d'incertitude (en général : UF = 100)

$$DJA = DSE/100$$

$$DJA = BMDL/100$$

Exemple : E100, Curcumine, Jaune orange

DES : 300 mg/kg poids corporel par jour

DJA : 3 mg/kg poids corporel par jour



Figure 19

Processus de fixation d'une dose journalière admissible ou acceptable (DJA) et exemple associé.

3.3. Mise en évidence de l'exposition

Pour apprécier la dangerosité d'une situation (**Figure 20**), il faut prendre en compte le degré d'exposition du sujet : savoir comment le consommateur est exposé au produit en évaluation et ce qu'il retrouve

dans les aliments. Des normes de langage ont été développées pour que les comparaisons soient cohérentes aussi bien en ce qui concerne les textes que les logiciels (voir les **figures 21** et **22**). Les logiciels sont consultables sur le site de l'EFSA.

IMPORTANCE DE L'EXPOSITION

- L'EFSA « recherche, recueille, rassemble, analyse et résume les données scientifiques et techniques pertinentes dans les domaines qui relèvent de sa mission. Cette action comprend notamment la collecte de données relatives [...] aux consommations alimentaires et à l'exposition des personnes aux risques liés à la consommation de denrées alimentaires » ;
- L'EFSA « coopère étroitement avec tout organisme opérant dans le domaine de la collecte des données, y compris ceux des pays ayant introduit une demande d'adhésion, ceux des pays tiers ou les organismes internationaux » .

Règlement (CE) N° 178/2002




Figure 20

L'importance de l'exposition pour l'EFSA.

FOODEX2

Le système de classification et de description des denrées alimentaires de l'EFSA

Un langage commun entre les données nationales

et entre la
consommation alimentaire
et les
données sur les occurrences

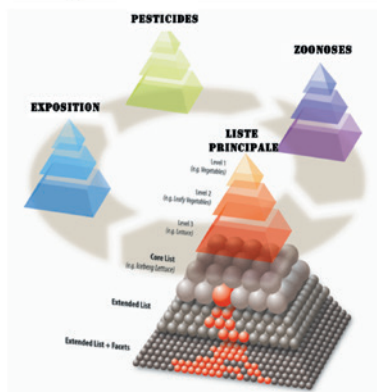


Figure 21

Système de classification et de description des denrées alimentaires de l'EFSA.

OUTILS DE L'EFSA EN ACCÈS LIBRE POUR L'ÉVALUATION DE L'EXPOSITION

Outils de calcul d'évaluation

Modèle d'Apport en Enzymes Alimentaires (MAEA)

Modèle d'Apport en Additifs Alimentaires (MAAA)

Outil d'exposition alimentaire

Évaluation Rapide de l'Exposition aux Contaminants (EREC)



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020323126>

Plus d'informations sur <https://www.efsa.europa.eu/en/science/tools-and-resources>

Figure 22

Outils de l'EFSA en accès libre pour l'évaluation de l'exposition.

Conclusion

Pour synthétiser l'ensemble de nos études sur la sécurité des aliments (**Figure 23**), on rapproche l'identification des dangers avec toutes les études faites sur leurs effets. On caractérise ces dangers : on a les points de départ, *i.e.* les seuils, qu'on a développés, mais aussi les DJA et on compare à l'exposition. Si la DJA est en dessous de l'exposition, on peut conclure à l'absence de risque, tandis que si elle est au-dessus, il y a un problème et le gestionnaire de risques doit envisager des mesures.

La **figure 24** considère des défis non encore traités, tels des nouveaux produits qui sont ou vont être sur le marché : on a déjà parlé des insectes ou de la texture nanométrique, mais il y a aussi des substances chimiques, pour lesquelles l'évaluation du risque demande de

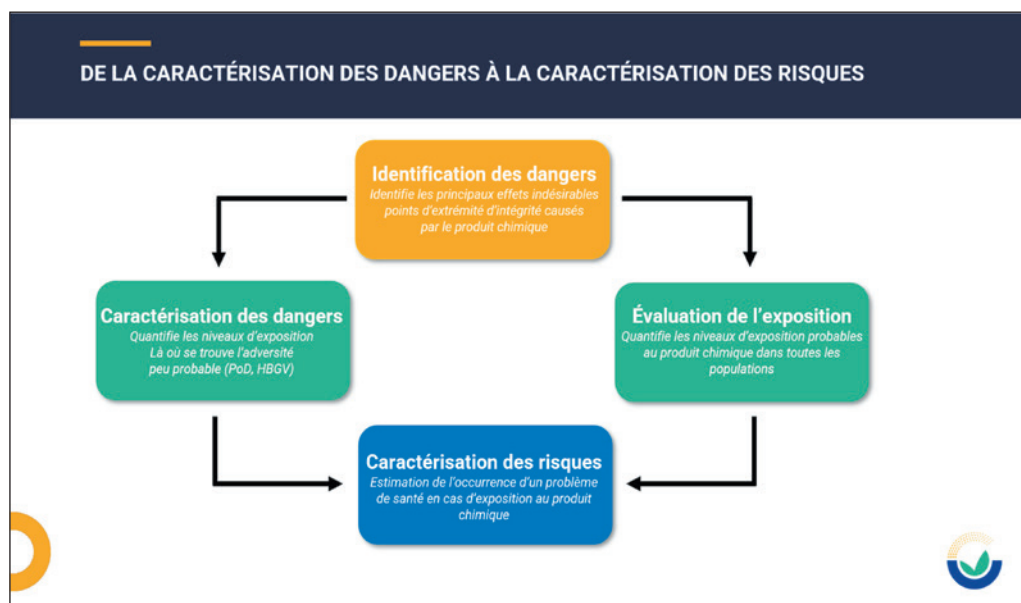


Figure 23

Schéma descriptif du passage de l'identification des dangers à la caractérisation des risques chez l'EFSA.



Figure 24

Listes des nouveaux défis et menaces – Sources de travaux de l'EFSA.

nouvelles techniques. Il y a aussi la question du risque environnemental dont on n'a pas parlé ici, mais qui pose de graves problèmes puisque tous les produits sont susceptibles de s'y retrouver. On peut aussi mentionner les dangers liés à la mondialisation, dont on peut penser qu'ils prendront de plus en plus d'importance vu l'attention croissante portée aux questions d'environnement.