

Synthèses

Structure des aliments et effets nutritionnels

A. Fardet, I. Souchon, D. Dupont, coordinateurs



éditions
Quæ

Structure des aliments et effets nutritionnels

Anthony Fardet, Isabelle Souchon,
Didier Dupont, coordinateurs

Éditions Quae
RD10, 78026 Versailles Cedex

Collection Synthèses

Les milieux rupicoles.

Les enjeux de la conservation des sols rocheux

Pierre Pech

2013, 168 p.

Flores protectrices pour la conservation des aliments

Monique Zagorec, Souad Christieans

2013, 160 p.

Agricultures à l'épreuve de la modernisation

Estelle Deléage

2013, 104 p.

Cultiver la biodiversité pour transformer l'agriculture

Étienne Hainzelin

2013, 264 p.

Organisations et sociétés paysannes.

Une lecture par la réciprocité

Éric Sabourin

2012, 282 p.

Apprendre à innover dans un monde incertain.

Concevoir les futurs de l'agriculture et de l'alimentation

Émilie Coudel, Hubert Devautour, Christophe-Toussaint Soulard, Guy Faure,

Bernard Hubert, coordinateurs

2012, 248 p.

Table des matières

Préface	5
<i>Jean FIORAMONTI</i>	

Introduction	7
<i>Anthony FARDET</i>	

PARTIE I. MATRICES ALIMENTAIRES ET ALIMENTS MODÈLES

1. La matrice alimentaire : définition, classification et caractérisation	13
<i>Guy DELLA VALLE, Isabelle SOUCHON et Marc ANTON</i>	

PARTIE II. LES ÉTAPES CLÉS DE LA PHYSIOLOGIE DIGESTIVE

2. Rôle de la sphère orale	35
<i>Gilles FÉRON et Christian SALLES</i>	

3. L'estomac : rôle de la cinétique de vidange gastrique	57
<i>Charles-Henri MALBERT</i>	

4. Les étapes clés de la digestion : l'intestin grêle	63
<i>Jean FIORAMONTI</i>	

5. Les étapes clés de la digestion : le côlon	73
<i>Jean FIORAMONTI</i>	

6. Le mucus	85
<i>Pascale PLAISANCIÉ</i>	

7. Hydrolyse enzymatique des aliments	101
<i>Véronique PLANCHOT</i>	

8. De la bioaccessibilité aux effets santé	119
<i>Anthony FARDET</i>	

PARTIE III. DES MATRICES COMPLEXES AUX EFFETS MÉTABOLIQUES ET SANTÉ

9. Impact de la matrice alimentaire des aliments de type grains et graines	129
<i>Valérie MICARD, Luc SAULNIER, Valérie GREFFEUILLE et Anthony FARDET</i>	
10. Devenir digestif des matrices végétales de type fruits, légumes et boissons dérivées	151
<i>Catherine RENARD et Fabienne GUILLON</i>	
11. Devenir digestif des matrices laitières : application aux fractions protéiques	171
<i>Florence BARBÉ, Yves BOIRIE, Didier DUPONT et Claire GAUDICHON</i>	
12. Devenir digestif des lipides des matrices laitières	185
<i>Martine ARMAND, Isabelle CRENON et Christelle LOPEZ</i>	
13. Devenir digestif des matrices animales de type viande	199
<i>Véronique SANTÉ-LHOUTELLIER, Marie-Laure BAX, Marie-Agnès PEYRON et Didier RÉMOND</i>	
14. Devenir digestif et effets métaboliques des matrices formulées à base de lipides	215
<i>Anne MEYNIER, Marie-Caroline MICHALSKI, Sébastien MARZE, Hernan Brice KENMOGNE-DOMGUA, Manar AWADA, Claude GENOT</i>	
15. Matrice alimentaire et biodisponibilité des caroténoïdes	241
<i>Patrick BOREL, Antoine DEGROU, David PAGE et Catherine CARIS-VEYRAT</i>	
16. Structure physique des fibres alimentaires et devenir fermentaire	255
<i>Anthony FARDET</i>	
17. Devenir digestif des polyphénols des fruits et légumes	267
<i>Claire DUFOUR et Olivier DANGLES</i>	
18. Devenir digestif des polyphénols des grains et graines	287
<i>Natalia ROSA et Valérie MICARD</i>	

PARTIE IV. MODÉLISER LE DEVENIR DIGESTIF DE L'ALIMENT

19. Les modèles humains	299
<i>Claire GAUDICHON</i>	
20. Les modèles animaux	307
<i>Didier RÉMOND, Marie-Laure BAX, Caroline BUFFIÈRE et Isabelle SAVARY-AUZELOUX</i>	

21. Les modèles <i>in vitro</i>	321
<i>Stéphanie BLANQUET-DIOT, Aurélie GUERRA, Lucie ÉTIENNE-MESMIN, Sylvain DENIS, Marie-Agnès PEYRON et Monique ALRIC</i>	
22. Les modèles <i>in silico</i>	337
<i>Steven LE FEUNTEUN et Béatrice LAROCHE</i>	
PARTIE V. DES EFFETS SANTÉ À L'ALIMENT : INGÉNIERIE RÉVERSE ET ALIMENTS FONCTIONNELS	
23. Sucres <i>lents</i>, préhydrolyse et préfermentation	353
<i>Anthony FARDET</i>	
24. Préhydrolyse de l'acide férulique lié pour augmenter sa biodisponibilité	367
<i>Natalia ROSA et Valérie MICARD</i>	
25. Stratégies de contrôle de la biodisponibilité des lipides	373
<i>Martine ARMAND</i>	
26. Aliments et contrôle de l'allergénicité	415
<i>Chantal BROSSARD, Jean-Marc CHOBERT et Sandra DÉNERY-PAPINI</i>	
27. Alimentation des nouveau-nés et formules infantiles	429
<i>Isabelle LE HUËROU-LURON, Karima BOUZERZOUR, Pierre SCHUCK et Didier DUPONT</i>	
28. Alimentation des personnes âgées	441
<i>Laurent MOSONI et Dominique DARDEVET</i>	
Conclusion générale	451
<i>Anthony FARDET</i>	
Vers une approche plus holistique	455
<i>Anthony FARDET</i>	
Liste des auteurs	456

Préface

Cet ouvrage aurait pu s'appeler *La rencontre de deux boîtes noires* : d'un côté un aliment à la structure mystérieuse, de l'autre un tube digestif tout aussi, sinon plus, mystérieux, avec à la sortie un sujet en bonne santé. Dans notre société actuelle, la valeur santé des aliments est au premier rang des préoccupations des individus. Le malheur est que le plus souvent l'avis des incompetents prédomine sur les données sérieuses des nutritionnistes. Sans parler du fer des épinards rendu célèbre par la faute de frappe d'une pauvre dactylo, nous sommes tous les jours inondés de messages incohérents du style « le calcium du lait est mal absorbé ».

Le tube digestif est aussi une grande préoccupation. Au début du xx^e siècle, on pouvait lire sur une publicité pour des pilules laxatives : « La constipation abrège la vie. » Encore aujourd'hui, certains patients présentant des troubles digestifs sont mieux soignés par des psychotropes que par des médicaments à visée digestive.

Le premier chapitre sur la définition de la matrice alimentaire indique d'emblée le haut niveau scientifique de l'ouvrage. Pour le commun des mortels, un aliment est dur, mou ou craquant. Ici, on voit que les matrices sont parfaitement caractérisées à partir de données physicochimiques complexes, et cela pour la plupart des aliments couramment utilisés en Occident.

Outre l'abondance des données présentées, chaque chapitre offre des informations pertinentes pour les nutritionnistes. Après avoir lu cet ouvrage, il sera impossible de continuer à penser que la nutrition se résume à une somme de nutriments et de micronutriments que nous devons ingérer quotidiennement. L'ouvrage permet de rehausser la conception de « science molle » souvent attribuée à la nutrition. En d'autres termes, la nutrition qui ne prend pas en compte les caractéristiques physicochimiques des aliments n'est plus vraiment de la nutrition.

L'ouvrage présente également un grand intérêt pour les physiologistes. Tout le monde sait que le tube digestif est une machine infernale d'une efficacité extraordinaire. Il a été estimé que le tube digestif d'un homme traite environ cent tonnes d'aliments au cours de sa vie, et le plus souvent sans incident majeur. D'autres estiment qu'il s'agit d'un organe intelligent puisqu'il est très riche en neurones (autant de neurones dans le tube digestif que dans la moelle épinière). Plusieurs chapitres semblent confirmer cette théorie et montrent à quel point la physiologie du tube digestif s'adapte en permanence à la nature de l'aliment, pour mieux le digérer bien sûr. Un exemple frappant est donné dans le chapitre sur le rôle de la sphère orale dans la déstructuration de l'aliment. La mastication n'est pas un simple broyage permettant aux aliments de transiter à travers l'œsophage. Elle déclenche une cascade d'événements physiologiques qui *in fine* vont être déterminants dans la régulation de la satiété.

L'ouvrage devrait être aussi pris en considération par les agronomes qui réfléchissent à la manière dont nourrir la planète sur le long terme. Dans ce domaine, on entend beaucoup parler de calories, de protéines végétales ou encore de bilan carbone, mais pratiquement jamais de la structure de l'aliment, de sa palatabilité, de sa digestibilité ou de son pouvoir nutritionnel.

Enfin, l'avant-dernière partie de l'ouvrage, consacrée à la modélisation du devenir digestif des aliments, ouvre de très grandes perspectives. On peut rêver du jour où d'un simple clic on connaîtra la biodisponibilité d'un nutriment donné dans une matrice donnée.

En résumé, cet ouvrage porte un éclairage sur une face souvent négligée, mais ô combien importante, de la nutrition : le rôle de la structure de l'aliment dans ses propriétés nutritionnelles.

Jean FIORAMONTI,
Directeur de recherche à l'Inra,
département Alimentation humaine

Introduction

Anthony FARDET

En 1977, Haber *et al.* montraient chez dix sujets sains que la réponse glycémique (c'est-à-dire l'arrivée de glucose au niveau sanguin) suite à la consommation de pommes sous forme entière, de purée ou de jus, était d'autant plus rapide que la matrice alimentaire était déstructurée, et que la sensation de satiété diminuait parallèlement à cette déstructuration (Haber *et al.*, 1977). Or on sait que la réponse métabolique diffère selon la vitesse d'arrivée des glucides au niveau sanguin. Par ailleurs, une sensation de satiété accrue participe à un meilleur contrôle de la prise alimentaire et donc *in fine* du poids. Aujourd'hui, on parle de sucres plus ou moins *rapides* ou *lents*, cette dernière propriété étant utilisée par les diabétiques dans leurs choix alimentaires afin de mieux réguler leur glycémie et leur insulïnémie. En 1986, une étude réalisée chez douze volontaires allait dans le même sens en montrant que le fait d'avaler des aliments riches en glucides (maïs doux, pomme, riz blanc et pomme de terre) plutôt que de les mastiquer réduisait significativement la réponse glycémique, l'effet étant similaire à l'administration de sucres *lents* (Read *et al.*, 1986). Enfin, en 1991, le même type de résultat était obtenu chez l'homme suite à la consommation de pâtes alimentaires ou de pain fabriqués à partir du même ingrédient de départ, à savoir du blé dur, les pâtes entraînant une réponse glycémique et insulïnémique — donc hormonale — réduite comparée au pain (Granfeldt *et al.*, 1991). Ainsi, la propriété nutritionnelle n'est pas contenue dans la semoule de blé dur en tant que telle mais dans la matrice alimentaire mise en forme par le procédé technologique. Ces trois études mettent clairement en évidence qu'à composition constante en glucides, la nature de la matrice alimentaire influe significativement la réponse métabolique, donc l'effet santé ; et donc qu'un aliment n'est pas la seule somme de ses nutriments mais une matrice structurée qui contribue à ses effets métaboliques et santé.

Ce n'est que beaucoup plus tard que l'on s'est intéressé à d'autres nutriments que les glucides, comme les lipides et les protéines. La notion de protéines *lentes* et *rapides* a été ainsi proposée pour la première fois en 1997 (Boirie *et al.*, 1997). Boirie *et al.* ont montré que selon les propriétés physicochimiques des ensembles protéiques que sont la caséine et le lactosérum, la vitesse d'apparition des acides aminés au niveau plasmatique n'était pas la même, avec un effet significatif sur la vitesse de synthèse protéique postprandiale (Boirie *et al.*, 1997). Concernant les lipides, Armand *et al.* montraient deux ans plus tard que, selon la taille d'émulsions lipidiques de composition chimique identique, la vitesse de digestion n'était pas la même, avec des

conséquences métaboliques entraînant des applications potentielles importantes en nutrition entérale pour des sujets souffrant d'insuffisance pancréatique et d'un déficit enzymatique en lipase (Armand *et al.*, 1999).

Il ne suffit donc plus de modifier la composition chimique d'un aliment pour modifier son effet santé : il faut tenir compte également de la structure physique et des propriétés physicochimiques de sa matrice. Pourtant, ce passage d'une nutrition quantitative (un aliment est une somme de nutriments) à qualitative (un aliment est une matrice complexe qui influe sur sa valeur santé) est plutôt récent ; et ce n'est que depuis peu qu'émerge progressivement au niveau international cette prise de conscience par la communauté des chercheurs en nutrition et science des aliments. À tel point qu'aujourd'hui on cherche à contrôler les caractéristiques physicochimiques de la matrice alimentaire (par exemple le degré de gélatinisation de l'amidon, le degré de solubilité des fibres incorporées à la matrice ou les interactions moléculaires des nutriments entre eux) au travers des procédés technologiques pour contrôler et optimiser son effet santé (Norton *et al.*, 2006 ; 2007). Cette démarche s'appelle l'ingénierie reverse.

En effet, avant, on s'inquiétait surtout de savoir si l'aliment contenait tel ou tel nutriment considéré comme bon ou mauvais pour la santé. Puis on estimait que l'ensemble était digéré dans le tube digestif sans vraiment se soucier de la cinétique de libération des nutriments. Or on sait aujourd'hui que tous les éléments constitutifs d'un aliment ne sont pas biodisponibles à 100 % — une fraction arrive donc au niveau du côlon —, et que leur cinétique de libération peut influencer grandement l'effet santé global de l'aliment. L'exemple de l'amidon sera présenté dans le détail pour illustrer ces concepts. Aujourd'hui, les équipes de recherche en science des aliments appliquée à la nutrition tendent à considérer l'aliment non plus comme un ensemble de composés isolés mais comme une somme de constituants imbriqués, en interaction les uns avec les autres, mais aussi avec les autres aliments et constituants du régime (Slattery, 2008). C'est cette dernière perspective qui est désormais à mettre en relation avec les effets santé. Cette évolution reflète aussi la tendance à considérer la recherche en nutrition d'un point de vue plus holistique et intégratif, après des décennies de recherches réductionnistes basées sur l'étude de l'effet santé des composés alimentaires pris isolément (Jacobs *et al.*, 2009). La démarche réductionniste a abouti au développement des aliments fonctionnels souvent enrichis en un seul composé reconnu comme améliorant une fonction physiologique donnée. Cela n'a pas empêché le développement toujours croissant de la prévalence des maladies chroniques et/ou métaboliques liées à une mauvaise alimentation telles qu'obésité, diabète, maladies cardiovasculaires, stéatose hépatique, ostéoporose et cancers.

Outre les principaux macronutriments que sont les glucides, les protéines et les lipides, on sait aujourd'hui qu'il existe, pour la plupart des autres composés que sont les vitamines, les minéraux et les phytomicronutriments (par exemple les polyphénols et les caroténoïdes), des fractions à la fois liées (à d'autres composés de l'aliment) et libres (notamment dans le cytoplasme cellulaire). On sait de plus que selon la nature de ces interactions, la vitesse et le lieu d'absorption du micronutriment peuvent différer. Il n'y a donc qu'un pas à franchir pour élargir la notion de glucides *lents* et *rapides* à tous les composés nutritionnels de l'aliment. Par exemple, l'acide

féruque — qui est un polyphénol — est en général présent à la fois sous forme libre ($\sim 1-5\%$) et liée ($\sim 95-99\%$) dans les céréales complètes. Or chaque fraction a un devenir digestif différent avec des modes d'action métabolique différents, et donc des effets santé différents, si bien qu'on peut presque parler également d'acide féruque *lent* et *rapide* (Fardet, 2010). Cependant, excepté pour les glucides — plus particulièrement l'amidon —, on est aujourd'hui très loin de savoir dire quels sont les effets santé à long terme selon les cinétiques de libération de tel ou tel nutriment.

L'objectif principal de cet ouvrage est donc de réaliser un état de l'art sur les connaissances actuelles relatives à l'influence des caractéristiques physiques et/ou des propriétés physicochimiques de la matrice alimentaire sur le devenir digestif, métabolique et les effets santé des nutriments en considérant à la fois les macronutriments (glucides, lipides et protéines), les micronutriments (vitamines, polyphénols, minéraux, caroténoïdes, etc.) et les fibres. En d'autres termes, l'objectif est de mettre en évidence que la matrice alimentaire conditionne l'effet santé des aliments et qu'il devient donc possible de modifier les propriétés physiques et physicochimiques de cette matrice pour contrôler le devenir digestif des aliments et le devenir métabolique des nutriments et composés bioactifs. Il ne s'agit plus de considérer la nutrition selon une perspective quantitative (à savoir tel aliment contient x g de protéines, y g de lipides, z mg de vitamines, etc.), mais plutôt selon une perspective qualitative impliquant des notions d'interaction des nutriments au sein de la matrice, des notions de bioaccessibilité enzymatique, de biodisponibilité digestive et de devenir métabolique en fonction des cinétiques de libération dans le tube digestif.

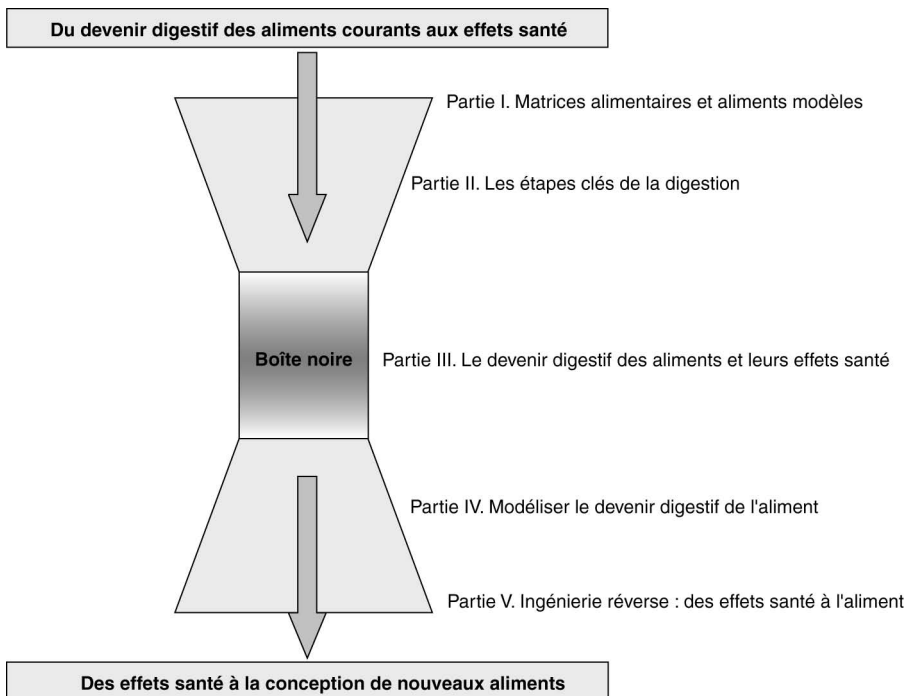


Figure 1. Schéma conceptuel de l'ouvrage.

L'ouvrage est ainsi organisé en cinq grandes parties (voir schéma conceptuel de l'ouvrage, figure 1) : la caractérisation des matrices alimentaires ; les étapes clés de la digestion, notamment en rapport avec l'influence de la structure physique de l'aliment ; le devenir digestif des grands types d'aliments et les répercussions sur les effets santé potentiels ; les techniques en appui à la modélisation et à la prédiction du devenir digestif des aliments ; et l'ingénierie réverse, à savoir comment, à partir des données collectées sur le devenir digestif des aliments, on peut « revenir en arrière » et concevoir des aliments dont on contrôlerait le devenir digestif.

► Références bibliographiques

- ARMAND M., PASQUIER B., ANDRE M., BOREL P., SENFT M., PEYROT J., SALDUCCI J., PORTUGAL H., JAUSSAN V., LAIRON D., 1999. Digestion and absorption of 2 fat emulsions with different droplet sizes in the human digestive tract. *American Journal of Clinical Nutrition*, 70, 1096-1106.
- BOIRIE Y., DANGIN M., GACHON P., VASSON M.P., MAUBOIS J.L., BEAUFRERE B., 1997. Slow and fast dietary proteins differently modulate postprandial protein accretion. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 94, 14930-14935.
- FARDET A., 2010. New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: what is beyond fibre? *Nutrition Research Reviews*, 23, 65-134.
- GRANFELDT Y., BJORCK I., HAGANDER B., 1991. On the importance of processing conditions, product thickness and egg addition for the glycaemic and hormonal responses to pasta: a comparison with bread made from "pasta ingredients". *European Journal of Clinical Nutrition*, 45, 489-499.
- HABER G.B., HEATON K.W., MURPHY D., BURROUGHS L.F., 1977. Depletion and disruption of dietary fibre. Effects on satiety, plasma-glucose, and serum-insulin. *Lancet*, 2, 679-682.
- JACOBS D.R. JR, GROSS M.D., TAPSELL L.C., 2009. Food synergy: an operational concept for understanding nutrition. *American Journal of Clinical Nutrition*, 89, 1543S-1548.
- NORTON I., FRYER P., MOORE S., 2006. Product/process integration in food manufacture: engineering sustained health. *AIChE Journal*, 52, 1632-1640.
- NORTON I., MOORE S., FRYER P., 2007. Understanding food structuring and breakdown: engineering approaches to obesity. *Obesity Reviews*, 8 (suppl. 1), 83-88.
- READ N.W., WELCH I.M., AUSTEN C.J., BARNISH C., BARTLETT C.E., BAXTER A.J., BROWN G., COMPTON M.E., HUME K.E., STORIE I., 1986. Swallowing food without chewing: a simple way to reduce postprandial glycaemia. *British Journal of Nutrition*, 55, 43-47.
- SLATTERY M.L., 2008. Defining dietary consumption: is the sum greater than its parts? *American Journal of Clinical Nutrition*, 88, 14-15.

Partie I

Matrices alimentaires
et aliments modèles

Chapitre 1

La matrice alimentaire : définition, classification et caractérisation

Guy DELLA VALLE, Isabelle SOUCHON et Marc ANTON

Un aliment est une association de matières premières et de constituants, transformés à des degrés divers par différents traitements (mélange, cuisson, mise en forme, etc.) dont l'objectif est de lui conférer les fonctions d'usage recherchées. Celles-ci sont de plus en plus nombreuses et concernent des notions de sécurité et santé, de propriétés organoleptiques (aspect, texture, saveur et arôme), mais aussi de service ou encore d'équité, voire de sobriété, par respect de l'environnement. Ces traitements interviennent à l'échelle industrielle, mais aussi à l'échelle domestique lors de la préparation des repas par le consommateur, et modifient l'aliment dans sa composition (la cuisson va par exemple générer de nouveaux constituants) et sa structure (la gélification de certains constituants va solidifier l'aliment). La caractérisation des aliments requiert une description fine de leur composition, insuffisante seule pour comprendre les liens entre composition et propriétés nutritionnelles ou organoleptiques des aliments. Ainsi est apparue la notion de matrice alimentaire, qui intègre à la fois la composition et les interactions entre les constituants (Donald, 2004 ; Aguilera, 2006). La connaissance des interactions de ces constituants permet une description de la matrice qui se décline suivant ses différents niveaux d'organisation, depuis l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle macroscopique.

Les matrices alimentaires résultent des interactions et des assemblages de leurs constituants. Il a été démontré que leurs propriétés physiques et chimiques influencent les propriétés nutritionnelles et la santé des consommateurs. Des avancées significatives associant les sciences des aliments et de la nutrition ont permis de mieux comprendre l'effet de la structure de l'aliment sur la biodisponibilité des nutriments, des micronutriments, des composés phytochimiques, ou encore des substances toxiques présentes dans l'aliment par contamination de la chaîne, ou bien indésirables, générées par des processus réactionnels tels que l'oxydation par exemple. Outre leur efficacité à fournir des macro et micronutriments, les matrices alimentaires et leur structure peuvent également affecter la cinétique de mise à disposition au cours de la digestion d'une grande variété de molécules bioactives, qui remplissent soit un rôle positif, comme les peptides dans les produits de la viande ou du lait (Meisel, 2004) ou les substances phytochimiques telles que les polyphénols qui contribuent à la prévention des maladies cardiovasculaires (Das et Das, 2007) ; soit un rôle nuisible, comme les mycotoxines dans les produits à base de céréales (Visconti *et al.*, 2004). Certains nutriments peuvent générer les deux effets

selon la matrice alimentaire qui les contient. C'est le cas des acides gras polyinsaturés à longue chaîne (famille des n-3), qui présentent des propriétés bénéfiques pour la prévention de certains risques cardiovasculaires, de la maladie d'Alzheimer, de maladies liées au vieillissement, tout en étant très sensibles aux processus d'oxydation au cours des procédés de la digestion donnant lieu à la génération de composés à risques inflammatoires et toxiques. La matrice alimentaire peut donc être vue comme vecteur d'un ensemble de constituants dont la mise à disposition pour l'organisme sera modulée pour partie par leurs interactions. La libération de ces composés, et donc leur bioaccessibilité, est affectée par la structure complexe, multiéchelle, de la matrice élaborée par le procédé de transformation.

Un des défis de la science des aliments est aujourd'hui de fournir des modèles afin de prédire l'équilibre entre bénéfices nutritionnels et risques pour la santé, à partir d'une matrice alimentaire donnée de composition et de structure connues. La mise en place de modèles prédictifs est donc indispensable, et les collaborations interdisciplinaires entre physicochimistes, nutritionnistes et mathématiciens doivent se multiplier.

Dans ce contexte, l'objectif de ce premier chapitre est de donner un aperçu de la diversité des matrices alimentaires. Dans une première partie, nous définissons quelques propriétés physiques élémentaires qui caractérisent les aliments, en rappelant le principe des méthodes permettant de les déterminer, et nous les illustrons par quelques exemples de résultats. Nous ne détaillerons pas les éléments de composition et la caractérisation biochimique, largement traités dans d'autres ouvrages, bien que les connaissances qui y ont été établies soient indispensables pour l'approche proposée ici. Dans une seconde partie, ces propriétés sont évoquées de manière approfondie en relation avec la structure à différentes échelles. Dans ce but, et compte tenu de la grande variété des aliments, nous proposons une classification simple à partir de laquelle sont extraits des aliments modèles, objets de caractérisation aux différents niveaux d'organisation de la matrice. C'est sur la base de ces connaissances structurales précises et fiables, établies pour des modèles reproductibles, que l'étude de l'impact nutritionnel des aliments peut être envisagée.

► Propriétés physiques et caractéristiques structurales de matrices alimentaires

Masse volumique et densité

Le consommateur achète ses aliments au poids (ou par unité de masse) mais les ingère plutôt par unité de volume (l'assiette est plus ou moins pleine). Le rapport entre ces deux quantités est la masse volumique ρ (kg/m^3), ou densité (sans unité) lorsqu'elle est ramenée à celle de l'eau ($\rho_{\text{eau}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$). Nous emploierons indifféremment les deux termes dans la suite, d'autant qu'en anglais *density* se traduit par « masse volumique ». Lorsqu'un aliment ne contient pas d'air dans des pores, sa densité, définie alors comme densité intrinsèque, ou solide, peut être déduite de sa composition élémentaire par la relation : $1/\rho = \sum_i (X_i/\rho_i)$ (1)

où X_i est la fraction massique du constituant I ($\sum_i X_i = 1$) et ρ_i sa densité, pour laquelle les valeurs couramment admises sont rapportées en tableau 1.1.

Tableau 1.1. Valeurs élémentaires de densité des constituants majeurs des aliments (d'après Choi et Okos, 1986).

Constituant	Densité
Glucides	1,55
Protéines	1,35
Matières grasses	0,93
Minéraux (cendres)	2,4

La relation (1) s'applique également aux produits dispersés liquides tels que les émulsions, dont la fabrication impose le mélange de deux phases non miscibles. L'une d'elles (la phase dispersée) s'intègre dans l'autre (phase dispersante) sous forme d'objets sphériques (bulles ou gouttelettes) car la sphère est la forme géométrique offrant la surface d'interface la moins importante pour un volume donné. C'est la densité de chacune des phases, ou densité intrinsèque, qui est prise en compte pour déterminer la densité de la matrice alimentaire.

Si l'aliment contient des pores, de l'air, sa densité apparente ρ^* et sa densité intrinsèque ρ sont reliées par la porosité, P , définie comme la fraction de volume des vides par rapport au volume total :

$$P = 1 - \rho^*/\rho \quad (2)$$

La mesure de ces grandeurs n'est pas toujours triviale. Elle fait appel à des principes de déplacement de fluides, d'invasion des pores (mercure) et, indirectement, à des méthodes de microscopie pour évaluer la taille des pores. Elle peut être déterminée avec précision par la tomographie aux rayons X, qui, grâce à l'analyse d'images, permet d'évaluer la structure cellulaire de solides alvéolaires en définissant les distributions de taille des cellules, leur forme, leur nombre, mais aussi l'épaisseur de leur paroi (Van Dalen *et al.*, 2007). C'est l'une des techniques non destructives les plus puissantes pour obtenir des images directes de matériaux hétérogènes, à l'échelle intermédiaire de quelques microns.

Comme le montrent les valeurs de densité rapportées au tableau 1.2, la porosité, assez faible pour la plupart des aliments, peut avoisiner 80 % pour des produits céréaliers (pain, gâteaux) ou des desserts lactés foisonnés (mousses), et atteindre 30 % pour des fruits charnus (pomme par exemple, d'après Mebatsion *et al.*, 2008). Cependant, même en quantité et en taille infimes, la présence de pores peut jouer un rôle important sur la migration d'espèces chimiques et sur les transferts de chaleur et les propriétés mécaniques, en créant des zones barrières et des points de fragilité. Dans le processus digestif, la présence de pores affecte l'accessibilité des enzymes au substrat, et peut modifier, par exemple, la vitesse d'hydratation par la salive.

Teneur en eau, diffusivité, migration

Principal constituant de nombreux aliments, où elle est présente en quantités très variables (voir tableau 1.2), la teneur en eau est la variable la plus importante pour la

qualité des aliments, tant sensorielle que nutritionnelle. En effet, l'eau joue un rôle ubiquiste, structurant, dispersant, plastifiant, vecteur de chaleur et de molécules. Pour tous ces aspects, qui ont suscité un grand intérêt pour de nombreux chercheurs en sciences des aliments, nous renvoyons le lecteur vers l'ouvrage coordonné par Le Meste *et al.* (2003), *L'eau dans les aliments*. La teneur peut être déterminée par des méthodes de séparation physique (dessiccation, distillation, séchages, etc.) ou basées sur une réaction chimique (dosages Karl Fischer, P_2O_5). Pour des activités de l'eau (A_w , pour *water activity*, ou humidité relative) données, la détermination de la teneur en eau permet d'établir les isothermes de sorption, dont la connaissance est indispensable pour la conservation des aliments. Des méthodes physiques, indirectes et non destructives (résonance magnétique nucléaire, ou RMN, spectroscopie en proche infrarouge, ou NIRS), renseignent en outre sur la localisation et l'état de liaison des molécules d'eau.

Rhéologie et propriétés mécaniques

Le comportement rhéologique d'un produit est défini par les relations entre les forces qui lui sont appliquées et les déformations ou vitesses de déformation qui en résultent. Les aliments peuvent être liquides, et caractérisés par leur viscosité η , ou solides, et caractérisés par leur module d'élasticité E ; dans la réalité, leur comportement est souvent intermédiaire : l'aliment possède les deux caractéristiques, on dit alors que son comportement est viscoélastique.

Ces deux propriétés sont importantes car elles définissent le comportement du produit lors de son élaboration, elles sont reliées à sa texture et leur variation dans un intervalle de déformation et de temps donné nous renseigne sur la structure de l'aliment. En outre, elles gouvernent l'écoulement ou le transport du produit dans les procédés de déstructuration, tels que le tube digestif, au point que certains auteurs évoquent « l'homéostasie rhéologique » (Lentle et Janssen, 2008). Pour relier la structure des matrices à l'utilisation métabolique des nutriments qui la composent, il faut donc appliquer des méthodes rhéologiques en reproduisant des sollicitations mimant les conditions physicochimiques régnant dans le tractus gastro-intestinal (mastication, phases gastrique et intestinale). Cet aspect est un enjeu méthodologique majeur pour les sciences alimentaires. Les concepts et méthodes de la rhéologie ont fait l'objet de nombreux ouvrages et de cours de 2^e cycle (voir le site du Groupe français de rhéologie¹), aussi nous limiterons-nous ici à quelques exemples sur des aliments réels en fournissant les principaux concepts qui permettent de les éclairer.

Pour les produits liquides, par exemple des crèmes dessert, les courbes d'écoulement (figure 1.1A) montrent que la contrainte τ , rapport de la force sur la surface, est reliée à la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ par la loi dite « loi de puissance », ou loi d'Ostwald :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3a)$$

et la viscosité

$$\eta = \tau/\dot{\gamma} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3b)$$

1. <<http://www.legfr.fr/spip.php?rubrique4>>.