

La construction des aliments :

une question de chimie

Un aliment est un ensemble complexe qui ne résulte pas de la simple juxtaposition de ses différents constituants. Pour en comprendre la construction et évaluer les interactions mises en jeu, les laboratoires de recherche du département CEPIA (Caractérisation et élaboration des produits issus de l'agriculture) de l'INRA utilisent des approches appelées d'« ingénierie inverse » *(paragraphe 2.2.1)* pour déconstruire l'aliment et remonter jusqu'à l'ingrédient puis à la molécule. Dans un contexte de développement durable et de ré-évaluation des procédés pour une conception plus écologique des aliments, les qualités nutritionnelles, sanitaires et sensorielles des aliments doivent être conservées. C'est ce double défi que ces équipes doivent relever pour inventer les aliments du XXI^e siècle.

1 La mayonnaise, un exemple de la complexité des aliments

La mayonnaise *(Figure 1)*, si commune, est un bon exemple de système complexe, à la fois par la multiplicité des molécules qui la composent,

par la diversité des interactions à différentes échelles et par les dynamiques spatio-temporelles qui s'y déroulent, de l'échelle nanométrique (le milliardième de mètre) à l'aliment dans son ensemble. La physique pour les études structurales, la chimie pour l'étude des réactions, la physico-chimie pour l'étude des procédés et des fonctionnalités, doivent être simultanément utilisées pour bien connaître cet aliment et ses évolutions.

On pourrait comparer la mayonnaise à une voiture, qu'il suffit de démonter entièrement en pièces détachées pour voir la complexité de sa composition, et pour comprendre combien les multiples interactions entre les pièces, des plus petites aux plus grandes, chacune ayant sa fonction au sein du montage, contribuent au fonctionnement



Figure 1

Quelle complexité se cache derrière la mayonnaise ?

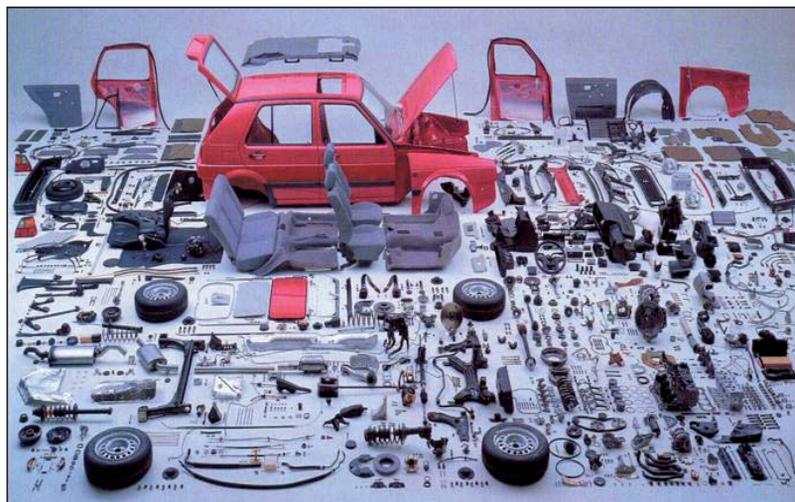


Figure 2

Une voiture : un mélange complexe de pièces, telles des molécules chimiques en interaction dynamique, pour le fonctionnement de l'édifice.

Figure 3

La constitution microscopique de la mayonnaise : un ensemble très organisé dont chaque élément a une fonction précise.

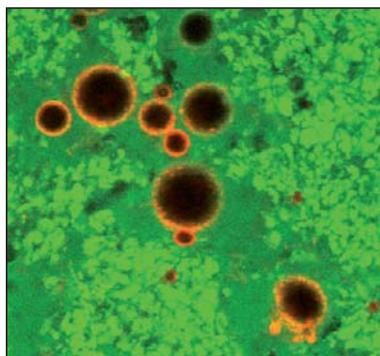


Figure 4

Composition d'une mayonnaise.

du produit final (Figure 2). Par analogie, si nous examinons la composition d'une mayonnaise dans un microscope, nous identifierons une phase aqueuse, dans laquelle baignent des protéines (en vert sur la Figure 3), des gouttelettes d'huile (en marron), ainsi qu'un film interfacial qui entoure ces gouttelettes (en orange).

L'étude complète de ce système, comme celle des autres produits alimentaires, devra commencer par les ingrédients de la mayonnaise, pour ensuite identifier les interactions physico-chimiques, et comprendre les fonctions de chacun de ces ingrédients au sein de l'édifice. Et enfin, la mayonnaise n'aura plus de secret pour nous !

Pour tout produit alimentaire, peut être établie une liste indiquant sa valeur nutritive et le détail de ses ingrédients. Prenons la liste des ingrédients d'une mayonnaise du commerce (Figure 4). Elle contient de l'huile, du vinaigre, du citron, du sucre,

Valeur nutritive moyenne : 700 kcal

Protéines : 1,2 g

Glucides : 0,7 g

Lipides : 81 g

Ingrédients :

huile végétale (70 %)

jaune d'oeuf (7,5 %)

vinaigre

moutarde

jus de citron

sel, sucre

sirop de glucose

épices

gomme xanthane (E415)

amidon modifié (E1422)

β-carotène (E160)

jaune d'oeuf

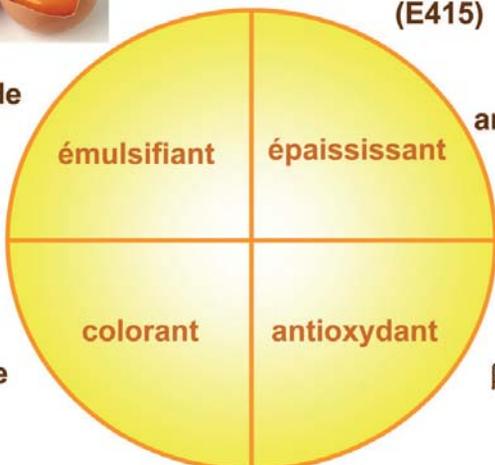


gomme xanthane (E415)

moutarde



amidon modifié (E1422)



β-carotène (E160)

β-carotène (E160)

auxquels ont été ajoutés des **émulsifiants** (qui se trouvent dans le jaune d'œuf) et la moutarde, qui permettent à la mayonnaise de « tenir » ; elle contient également divers additifs dont des **épaississants** comme la gomme xanthane et l'amidon modifié qui contribuent à sa texture (à propos de la texturation des aliments, voir le [Chapitre de M. Desprairies](#)), un **colorant**, le β -carotène, qui joue aussi le rôle d'**antioxydant nécessaire pour une bonne conservation** (le [Chapitre de S. Guyot](#) traite de la coloration des aliments), ainsi que des ingrédients qui relèvent le goût, comme le sel, le sucre, les épices, le sirop de glucose (la notion de goût est analysée dans le [Chapitre de P. Etiévant](#)).

Chacun de ces ingrédients a un rôle spécifique et le tout est mélangé par un procédé thermomécanique qui crée de nombreuses et nouvelles interactions entre les molécules. La stabilité d'une mayonnaise ne peut donc s'expliquer par un simple mélange entre de l'eau et de l'huile qui sont pourtant ses principaux constituants. En effet, l'eau et l'huile ne se mélangent pas naturellement, le mélange ne se fait que si une énergie mécanique est apportée (fouet à main, mixer de cuisine ou équipement industriel) ; le mélange génère une suspension de gouttelettes d'huile dans une phase aqueuse (donc une émulsion), mais comme l'énergie de l'état dispersé est supérieure (c'est-à-dire qu'il est moins stable) à celle de l'état non dispersé, le mélange, la mayonnaise, est

un système *thermodynamiquement instable*. De plus, il faut pouvoir la conserver plusieurs semaines, ce qui introduit la notion de *stabilité cinétique*, c'est-à-dire une stabilité qui dure dans le temps ([Figure 5](#)).

1.2. Les fonctions des ingrédients

C'est à l'interface entre la gouttelette d'huile et l'eau que se passent les phénomènes les plus importants : il faut trouver les bons ingrédients c'est-à-dire les bonnes molécules qui stabilisent cette émulsion et donc rallongent sa durée de conservation.

1.2.1. Les émulsifiants

Les premiers ingrédients entrant en jeu dans la stabilité de la mayonnaise sont les **émulsifiants**. Ce sont des molécules dites amphiphiles, c'est-à-dire comportant deux parties ([Figure 6](#)) : une « tête polaire » (portant souvent une charge, positive ou négative), qui est soluble dans l'eau, et une « queue hydrophobe » qui se caractérise par une ou plusieurs longues chaînes solubles dans les graisses (l'huile), mais pas dans l'eau. La lécithine (E322) en est un exemple. Le nom de ce lipide dérive du grec *Lekithos*, qui signifie jaune d'œuf, car il avait été initialement extrait d'un œuf par le pharmacien, chimiste français Théodore Nicolas Gobley, au milieu du XIX^e siècle.

Quelle que soit leur taille, les émulsifiants ont une affinité pour les deux phases (huile et eau) dans l'émulsion : ils diminuent l'énergie libre présente à l'interface entre

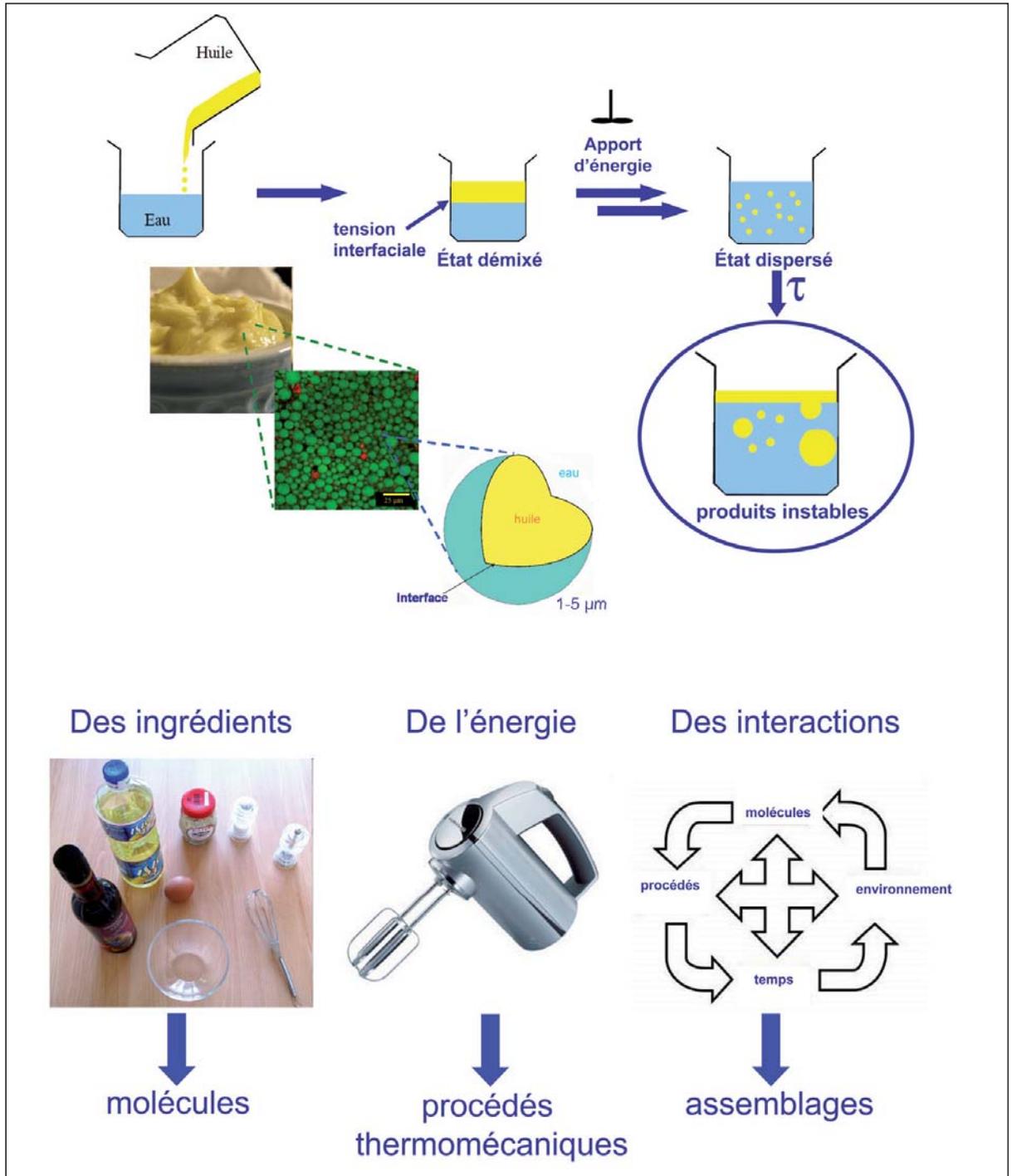


Figure 5

La mayonnaise est une émulsion d'huile (en jaune) dans de l'eau (en bleu). La création de cet état instable nécessite l'apport d'une énergie thermomécanique (fouet, mixer...).

l'huile et l'eau (et diminuent ainsi l'instabilité thermodynamique), et ils augmentent la rigidité du film interfacial. La résultante est qu'ils permettent à l'émulsion d'être stable pendant toute la durée de sa conservation et jusqu'à sa consommation. En l'absence

d'un bon émulsifiant, lorsque deux gouttes d'huile se percutent, si le film interfacial n'est pas suffisamment résistant, les deux gouttes fusionnent en une plus grosse : c'est le processus de la déstabilisation : au final, le produit est déphasé ; une couche

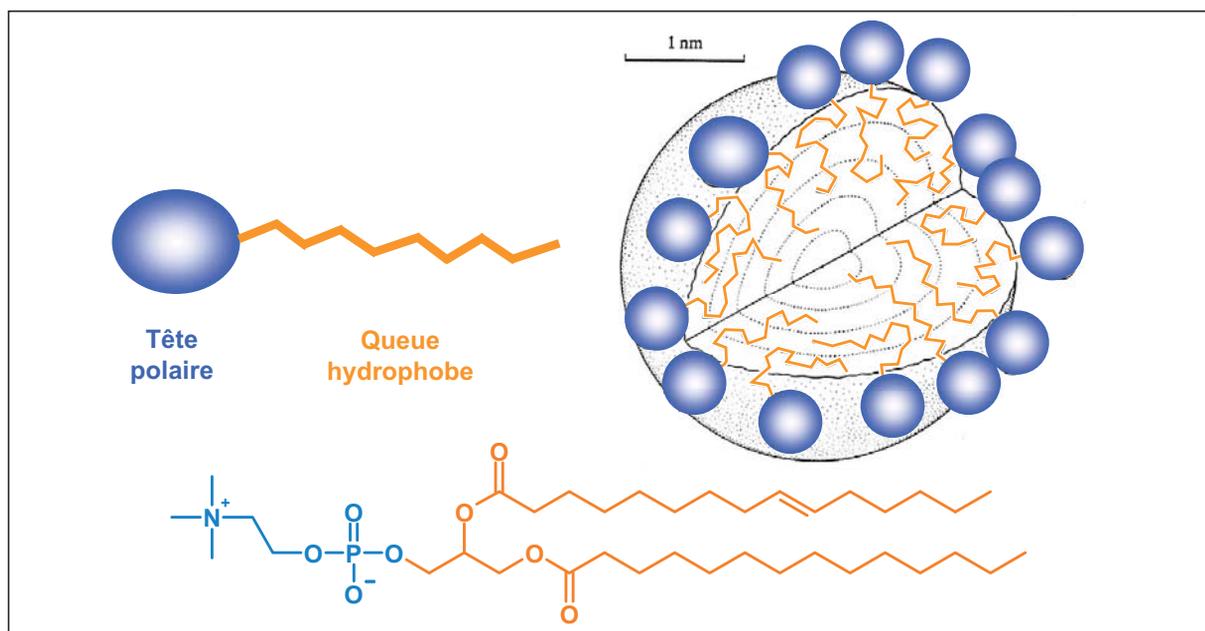


Figure 6

La lécithine (formule du bas) peut être utilisée comme émulsifiant dans des préparations telles que la mayonnaise. De par ses propriétés amphiphiles – elle possède une tête polaire (bleu) et une queue hydrophobe (orange) – elle est à la fois soluble dans l'eau (la partie polaire) et dans l'huile (la partie hydrophobe), ce qui lui permet de se positionner à l'interface eau/huile et de former des gouttelettes d'huiles dans l'eau (dessin à droite), ce qu'on appelle une émulsion.

d'huile se forme au-dessus de la mayonnaise, qui devient inconsommable (Figure 7).

Le choix des molécules émulsifiantes est donc très important pour assurer la formation de films interfaciaux résistants et contribuant à faire « tenir » les émulsions. En ce qui concerne la mayonnaise, les émulsifiants naturels qui proviennent de l'ajout de jaune d'œuf sont les LDL (« low density lipoproteins », voir l'Encart « Le cholestérol et ses transporteurs » du Chapitre de M. Barel), qui se présentent sous forme de nano gouttelettes dont les parois sont un film de phospholipides et d'apoprotéines de faible densité (ce sont des tensioactifs comportant une partie protéique et une partie non protéique). Ces gouttelettes (Figure 8) existent naturellement dans le jaune d'œuf : l'intérieur contient une huile constituée de triglycérides et de cholestérol. C'est un bel édifice chimique qui montre combien la nature a bien fait les choses !

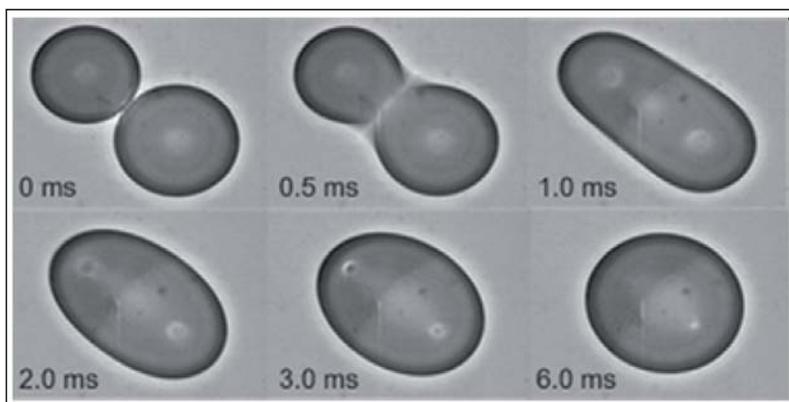


Figure 7

Des gouttelettes d'huile fusionnent entre elles et l'émulsion est destabilisée.

Cette structure procure aux LDL une grande capacité émulsifiante. Il est en effet possible de l'utiliser pour fabriquer une nouvelle émulsion qui sera mille fois plus grosse : quand on provoque la fusion de ces gouttelettes avec une interface huile/eau, elles s'étalent et créent ainsi une nouvelle interface, générant la nouvelle émulsion. À la

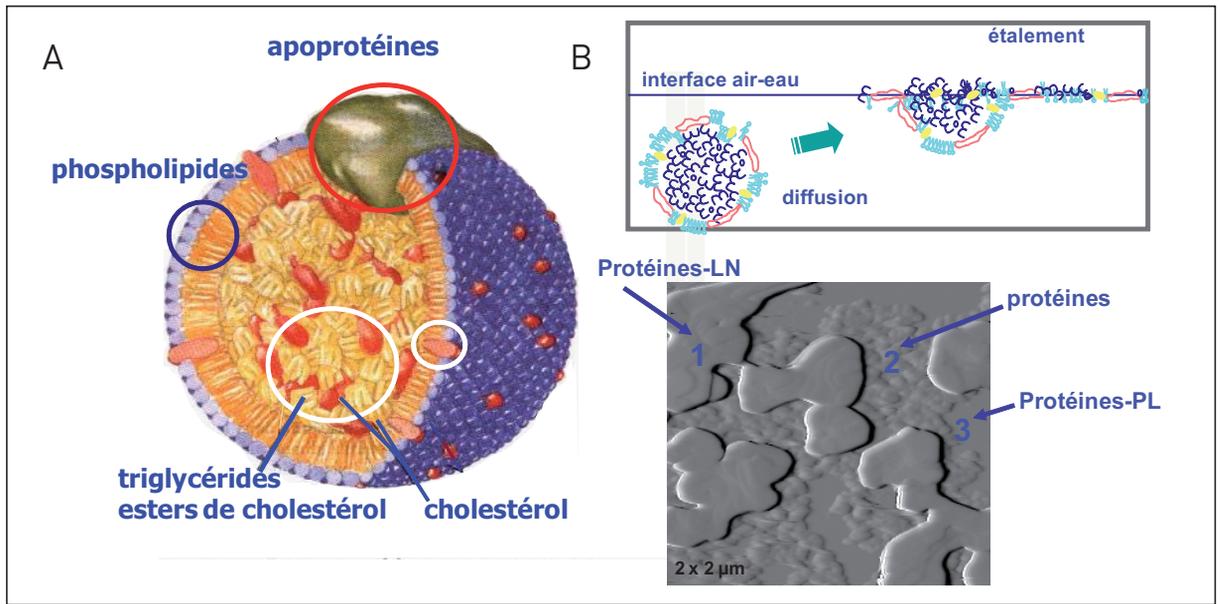


Figure 8

A) Structure du LDL du jaune d'œuf et son rôle dans la constitution du film interfacial (B).
 PL : Phospholipides ;
 LN : Lipides neutres.

manière d'une petite bulle de savon qui vient fusionner avec une autre pour générer une plus grosse bulle (Figure 8).

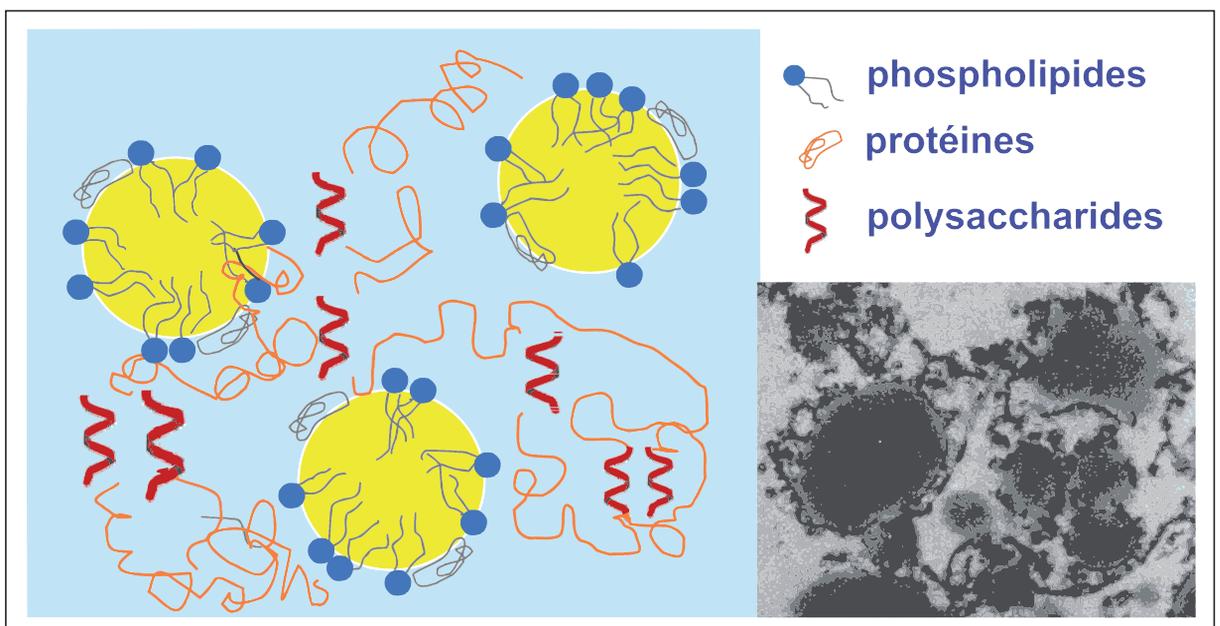
1.2.2. Les épaississants

Les seconds ingrédients importants dans la conception d'une mayonnaise sont les épaississants. Les industriels de l'agroalimentaire y ont souvent recours pour améliorer la stabilité des émulsions telles que la mayonnaise

ou le yaourt. Ce sont essentiellement des macromolécules telles que des protéines ou des molécules de la famille des polysaccharides (l'amidon, les alginate, etc. Ces épaississants sont décrits dans le Chapitre de M. Desprairies). Ajoutés à la phase aqueuse, ils en augmentent la viscosité et limitent le déplacement des gouttelettes d'huile, les empêchant ainsi de fusionner entre elles (Figure 9).

Figure 9

Les épaississants ont pour rôle d'empêcher la fusion des gouttelettes d'huile.



1.3. La réalisation du mélange : procédé de fabrication

L'énergie nécessaire pour créer l'émulsion est obtenue mécaniquement soit par un rotor-stator qui donne une émulsion grossière, soit par un homogénéisateur haute pression produisant une émulsion beaucoup plus fine. Pour fabriquer une mayonnaise industrielle, on combine généralement les deux procédés : on utilise d'abord un « moulin colloïdal¹ », muni d'un rotor qui tourne devant un stator avec un faible entrefer, suivie d'une deuxième homogénéisation à très haute pression (100 à 200 bars) qui permet d'obtenir une émulsion finale, plus fine, dans laquelle les gouttelettes mesurent entre deux et cinq microns (*Figure 10*).

Les émulsifiants présents dans le mélange permettent de stabiliser l'émulsion formée à l'issue de ce procédé, en s'adsorbant à la surface des gouttelettes.

2 Les nouvelles approches de l'industrie agroalimentaire dans l'étude de la construction des aliments

2.1. Conduire les recherches sur des systèmes modèles proches de la réalité

Les études sur des modèles menées jusqu'à présent dans l'industrie agroalimentaire

1. Un colloïde est un mélange homogène constitué d'une « phase » (solide, liquide ou gazeuse) dispersée dans un milieu continu (solide, liquide ou gazeux).

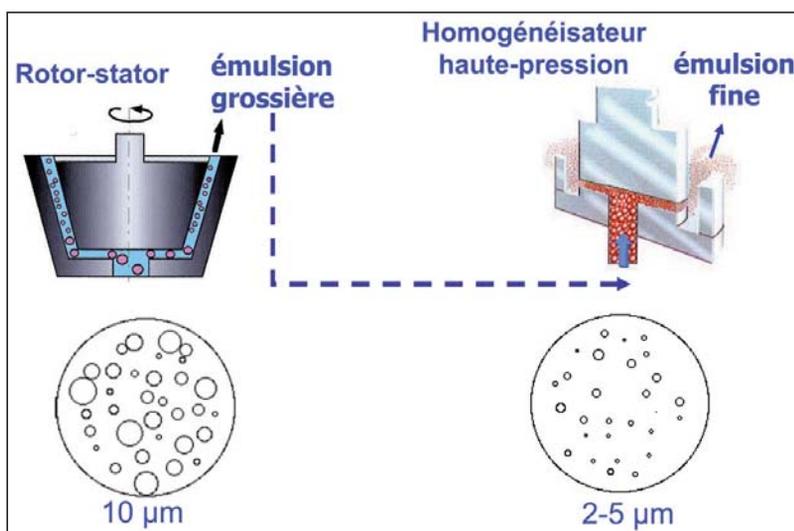


Figure 10

Procédé industriel de fabrication d'une mayonnaise.

n'étaient pas en accord avec la réalité pratique car elles ne prenaient pas en compte la notion d'assemblages de biopolymères². Maintenant, plutôt que de manipuler les objets uniquement à l'échelle moléculaire, les chercheurs et ingénieurs travaillent davantage sur des assemblages de plusieurs molécules, parfois de plusieurs milliers. Cette échelle leur permet d'obtenir des modèles et des résultats qui s'accordent mieux avec la réalité industrielle, en particulier celle qui est liée aux procédés à mettre en œuvre. C'est en prenant en compte la formation de certains assemblages de protéines et d'agrégats de toute taille, leur forme, leur structure et leur

2. Un polymère étant une macromolécule constituée d'un enchaînement d'unités moléculaires répétitives (appelées monomères), un biopolymère est un polymère que l'on trouve dans notre organisme et dans la nature : protéine (dont les monomères sont des acides aminés), polysaccharides (dont les monomères sont des molécules de la famille des sucres comme le glucose, le fructose, etc.).

compacité, que l'étude de la construction des aliments a été approfondie. Les agrégats, qu'ils soient formés naturellement ou par action thermomécanique, concourent directement aux propriétés de l'aliment et vont avoir une grande influence sur la formulation des produits alimentaires. Ainsi les scientifiques essaient de relier la structure des assemblages en solution, à l'interface (systèmes modèles), et la stabilité chimique et physique des systèmes dispersés réels (Figure 11).

Cette nouvelle approche multi échelles leur a aussi permis d'imaginer de nouvelles fonctionnalités, par exemple de séquestrer des molécules comme des vitamines ou des arômes dans de telles structures protéiques (ou dans d'autres types de molécules biocompatibles : polysaccharides³, lipides...). Ces molé-

cules pourront ainsi être encapsulées et stabilisées au sein d'un produit alimentaire.

Par ailleurs, les approches de modélisation ouvrent la porte à des prédictions d'évolution du système complexe que constitue l'aliment étudié : par exemple, on part des émulsifiants, qu'ils soient ou non assemblés, et on essaye de comprendre ce qui se passe dans l'aliment en modélisant les réactions aux interfaces, puis on intègre les aspects liés à la réalité industrielle en prenant en compte les procédés mis en jeu, l'environnement, la dynamique et la réactivité qui peuvent en résulter, etc.

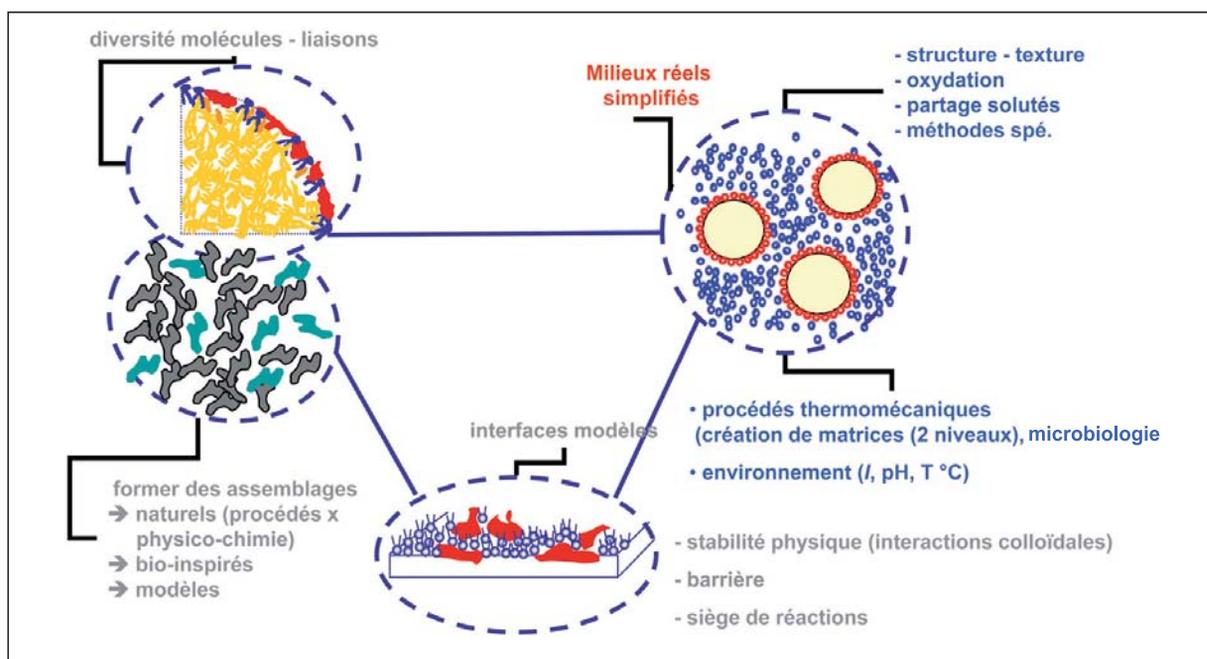
2.2. Trouver des réponses aux nouvelles attentes des consommateurs

Face aux besoins et attentes des consommateurs, l'industrie agroalimentaire doit répondre à un nouveau défi grandissant depuis quelques années : concevoir

Figure 11

Approche multi échelle des prévisions d'évolution du système constitué par l'aliment étudié.

3. Au sujet des polysaccharides, voir le Chapitre de M. Desprairies.



des aliments qui allient à la fois le plaisir (goût, aspect, texture), la facilité d'usage, tout en prenant en compte les questions de santé et de sécurité. S'y ajoute le souci d'utiliser des procédés de fabrication qui intègrent les aspects d'éco-conception⁴ pour contribuer à un développement durable.

2.2.1. L'approche de l'« ingénierie inverse »

Pour répondre à ces attentes, l'industriel doit d'abord être capable d'analyser l'ensemble des besoins des consommateurs, puis de concevoir les aliments en fonction de ces besoins. Deux étapes qui sont loin d'être simples.

La phase d'analyse à elle seule requiert des connaissances approfondies sur l'ingestion et la digestion des aliments, deux étapes clés qui doivent être approchées scientifiquement, en étudiant les effets de la composition et de la structure des aliments. Pour ce faire, il faut décomposer toutes les étapes de la « déconstruction » des aliments au cours de l'**ingestion** et de la **digestion**. Cela commence au niveau de la bouche, où les aliments sont mâchés (action mécanique) et parfois en partie digérés (action enzymatique), en même temps qu'arrivent à

notre cerveau tous les signaux chimiques dus à l'interaction de molécules (arômes, saveurs, épices, etc.) avec nos récepteurs sensoriels ou nos terminaisons nerveuses, à l'origine du goût et donc du plaisir ressenti quand on mange (les mécanismes liés à la sensation du goût sont décrits dans le *Chapitre de P. Etiévant*).

Concernant les qualités nutritives, les études n'étaient jusqu'à récemment basées que sur l'établissement de relations entre une liste d'ingrédients et l'effet observé sur le métabolisme des cellules, sans prendre en compte l'effet de la structure des aliments. Or, deux aliments ayant la même composition mais avec des structures différentes peuvent conduire à des effets différents d'un point de vue nutritionnel.

Enfin, un autre défi concerne l'analyse des phénomènes au niveau du tube digestif, dans lequel se produisent des modifications physiques (par exemple le brassage au niveau de l'estomac), chimiques et enzymatiques (suc gastrique, bile, insuline, etc.) qui conduisent à une restructuration de l'aliment : de nouvelles structures (des métabolites) se forment, avec de nouvelles propriétés, de nouvelles biodisponibilités et interactions avec l'organisme ; ils peuvent avoir plusieurs comportements possibles, comme le passage dans la circulation sanguine pour être distribués dans l'organisme (l'aspect nutritionnel des aliments et leur digestion sont abordés dans le *Chapitre de M.-J. Amiot-Carlin*).

4. L'éco-conception est une approche qui prend en compte les impacts environnementaux dans la conception et le développement du produit et les intègre tout au long de son cycle de vie (de la matière première, à la fin de vie en passant par la fabrication, la logistique, la distribution et l'usage).

Comprendre tous ces phénomènes – perception des aliments, absorption dans l'organisme, effets nutritionnels – en relation avec la structure des aliments : tel est le premier défi ambitieux que se donnent les scientifiques de l'alimentation. Le deuxième défi est de concevoir sur cette base des structures alimentaires basées sur ces nouvelles connaissances, afin de répondre au mieux aux besoins des consommateurs en matières gustative et nutritive. Enfin, il faut mettre au point les procédés permettant de créer ces nouveaux produits. L'ensemble de ces démarches constitue ce qu'on appelle l'« **ingénierie inverse** ». C'est un outil qui permet de revisiter les formulations et les procédés en intégrant en amont les propriétés attendues pour les utilisations en aval.

Un des défis de la recherche et du développement en agroalimentaire est de maîtriser les interactions ingrédients/structure/procédé/fonction.

2.2.2. Modéliser pour prédire

La modélisation est un outil où l'on traduit les connaissances acquises en modèles et en équations mathématiques dans le but de prédire la conduite d'un procédé. Pour faciliter la démarche de l'« ingénierie inverse », les scientifiques se dotent de méthodes et d'outils de plus en plus précis, conçoivent des modèles reproduisant les phénomènes en faisant varier autant de paramètres que souhaités ; et *in fine* font des prédictions. L'objectif est par exemple de prédire toute la conduite d'un procédé permettant à l'industriel d'obtenir un produit de bonne qualité.

On cherche maintenant à intégrer l'ensemble des connaissances issues des données expérimentales et des modèles que l'on a construits, et de façon plus large au niveau d'une filière : on part d'une expérimentation partielle et très spécifique, pour aller vers des réponses plus globales et génériques afin d'aider une filière donnée.

Concevoir les aliments de demain : un défi d'actualité pour les scientifiques

Le consommateur attend d'un aliment des propriétés sensorielles, nutritives, sanitaires et écologiques contrôlées et maîtrisées. Ce qui exige une bonne connaissance de tous les paramètres qui gouvernent la construction de l'aliment, sa transformation dans l'organisme et les conséquences sur toutes ces propriétés. Dans toutes les étapes de cet ensemble complexe, la chimie dans toutes ses approches joue un rôle majeur, en interaction constante avec la biologie, la physique et le génie des procédés. Les enjeux économiques et sociétaux sont énormes et les connaissances à acquérir, comme les défis à relever, laissent un large terrain d'exploration pour encore longtemps aux scientifiques.