



**République Algérienne Démocratique et Populaire.**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique.**



**Université Ahmed Zabana de Relizane.**  
**Faculté des sciences et de la technologie.**  
**Département des sciences agronomiques.**

**Dr HADRI Zouheyr**

**Maître de conférences A.**

**Email :** [hadrizouheyr@gmail.com](mailto:hadrizouheyr@gmail.com)

[Zouheyr.hadri@univ-relizane.dz](mailto:Zouheyr.hadri@univ-relizane.dz)

## ***POLYCOPIÉ DE COURS***

# **BIOCHIMIE ALIMENTAIRE**

**Niveau : 3<sup>ème</sup> année Licence.**

**Technologie agroalimentaire et contrôle de qualité.**

**Année Universitaire : 2021-2022.**

# Table des matières

## Avant-Propos

<b>Chapitre 1 : L'eau</b> .....	1
Généralité .....	1
1. Structure de l'eau.....	2
2. Propriété physique.....	3
3. Activité de l'eau .....	4
4. Comportement de l'eau des solutions lors de la congélation .....	6
5. Les isothermes d'adsorption .....	8
6. Phénomènes d'hystérésis des isothermes.....	9
7. Isotherme de sorption dans les I.A.A. ....	10
<b>Chapitre 2 : Les systèmes protéiques</b> .....	13
1. Propriétés physiques des protéines .....	13
2. Extraction des protéines alimentaires .....	19
3. Les protéines des œufs.....	24
4. Les propriétés fonctionnelles des protéines laitières et amélioration .....	29
5. Les ingrédients protéiques .....	33
<b>Chapitre 3 : Les lipides</b> .....	38
1. Propriétés chimiques et physiques des lipides .....	38
2. Propriétés fonctionnelles de certains corps gras .....	40
3. Les besoins nutritionnels en corps gras.....	42
4. Conservation et altération .....	46
<b>Chapitre 4 : Etude des polysaccharides</b> .....	54
1. La cellulose et ses dérivés.....	54
2. L'amidon .....	57
2.1. Phénomène de gélification et rétrogradation.....	62
2.2. Comportement rhéologique .....	62
3. Propriétés fonctionnelles de l'amidon natif et amidons modifiés .....	63
4. Les enzymes amylolytiques et leur utilisation .....	64

5. Les fibres alimentaires.....	65
5.1. Cas des pectines.....	66
5.2. La gélification.....	67
<b>Chapitres 5 : Systèmes alimentaires.....</b>	<b>69</b>
1. Aspects généraux.....	69
2. Système alimentaire d'origine végétale .....	71
2.1. Métabolites primaires et secondaires .....	71
2.2. Céréales, légumineuses, fruits et légumes.....	72
3. Systèmes alimentaires d'origines animales.....	79
3.1. Muscles.....	79
3.2. Œufs .....	81
3.3. Lait .....	85
4. Système alimentaire non conventionnelle.....	88
4.1. Protéines .....	89
4.2. Lipides.....	91
4.3. Biomasse .....	92
<b>Chapitre 6 : Altérations alimentaires.....</b>	<b>94</b>
1. Rôle de l'eau.....	94
2. Sources potentielles d'altérations .....	95
3. Altérations microbiologiques, enzymatiques et chimiques .....	96
<b>Références .....</b>	<b>104</b>

## **Avant-Propos**

Les pertes alimentaires et les intoxications alimentaires sont reconnues depuis des siècles, mais les causes de ces problèmes n'ont pas été comprises. Des améliorations des produits alimentaires par une manipulation appropriée et une transformation primitive ont été pratiquées sans en connaître les raisons. Les scientifiques et les technologues en alimentation ont commencé à étudier ces problèmes il y a environ 60 ans. Certaines causes d'altérations alimentaires peuvent être microbiologiques, physiques (mécaniques) et/ou chimiques (y compris biochimiques). Les scientifiques et les technologues de l'alimentation ont également reconnu depuis longtemps l'importance d'une formation en biochimie, en plus des sciences fondamentales (chimie, physique, microbiologie et mathématiques). Cela a été démontré par une exigence de cours de biochimie générale dans les premières exigences de cours de premier cycle recommandées de l'Institute of Food Technologists (IFT) aux États-Unis à la fin des années 1960.

Comprendre la biochimie alimentaire est la base de toutes les autres recherches et développements dans les domaines de la science, de la technologie et de la nutrition alimentaires, et la dernière décennie a vu des progrès accélérés dans ces domaines. La biochimie alimentaire est une sous-discipline composée des connaissances de base, des concepts et de la méthodologie liés aux propriétés chimiques des nutriments et autres constituants alimentaires et à leurs fonctions biochimiques, métaboliques et physiologiques.

Ce document s'adresse aux étudiants de 3<sup>ème</sup> année licence technologies agroalimentaire et contrôle de qualité. Il peut étudier dans différentes spécialités comme sciences alimentaires, nutrition humaine, sciences des aliments et technologies alimentaires. Cette matière vise également l'initiation des étudiants aux principales évolutions (ou modifications) biochimiques des constituants majeurs en cours des procédés technologiques. Ce polycopié vise à décrire aux étudiants les grands constituants alimentaires, leur importance en matière de propriétés technologiques et fonctionnelles. Il illustre l'importance de l'eau dans la composition des aliments et dans la transformation et la conservation alimentaire. Les propriétés des protéines, lipides et polysaccharides sont bien présentées dans ce papier. Connaître l'impact des altérations chimiques, enzymatiques et microbiologiques permet d'améliorer et diversifier les produits alimentaires en augmentant aussi leur durée de conservation.

# Chapitre 1 : L'eau

## Généralité

Il est très important pour la santé publique de disposer facilement d'une eau salubre, que ce soit pour la boisson, pour un usage domestique, pour la production alimentaire ou pour les loisirs. L'amélioration de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement et une meilleure gestion des ressources hydriques peuvent stimuler la croissance économique des pays et contribuer largement à réduire la pauvreté.

En 2017, 5,3 milliards de personnes avaient accès à des services d'alimentation en eau potable gérés en toute sécurité – c'est-à-dire qu'ils pouvaient utiliser des points d'eau améliorés se trouvant sur le lieu d'usage, disponibles à tout moment et non contaminés. Parmi les 2,2 milliards de personnes restantes n'ayant pas accès à des services gérés en toute sécurité en 2017.

L'eau est une substance unique et omniprésente qui est une composante majeure de tous les êtres vivants. L'eau est une composante majeure de tous les êtres vivants. Il est anormal dans plusieurs de ses propriétés physiques et chimiques. Certains sont essentiels à la vie tandis que d'autres ont des effets profonds sur la taille et la forme des organismes vivants, leur fonctionnement et les contraintes dans lesquelles ils doivent fonctionner. De nombreuses propriétés physiques fondamentales de l'eau peuvent maintenant être expliquées, au moins de manière semi-quantitative, en termes moléculaires et structurels, bien qu'en dépit d'études approfondies, elles restent incomplètement comprises.

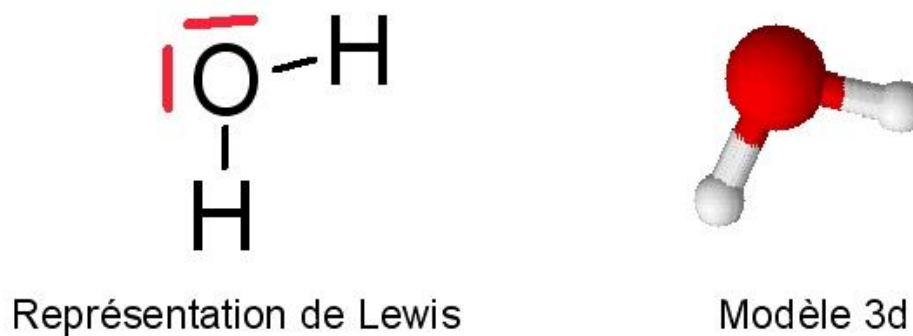
L'eau est essentielle à la survie de base car elle constitue jusqu'à 60% du corps humain adulte. Cependant, l'eau contaminée peut propager des maladies et provoquer des empoisonnements. Les agents pathogènes tels que les bactéries, les virus et les parasites peuvent se propager par l'eau et provoquer des maladies transmissibles. La plupart d'entre eux sont considérés comme transmissibles car ils peuvent se propager d'une personne à une autre via de l'eau contaminée ou d'autres vecteurs. L'eau est donc un vecteur de propagation des agents pathogènes et d'autres dangers pour la santé environnementale.

Les maladies les plus courantes sont les maladies diarrhéiques, telles que le choléra, la typhoïde, la paratyphoïde, la salmonelle, la giardiase et la cryptosporidiose. D'autres dangers environnementaux pour la santé peuvent être des constituants chimiques et radioactifs de l'eau. En effet, certaines substances chimiques dissoutes dans l'eau à la suite de processus naturels peuvent

être des ingrédients essentiels de l'apport alimentaire, et certaines peuvent être nocives lorsqu'elles dépassent certaines concentrations. Ce sont des métaux, des matières organiques synthétiques et des éléments essentiels tels que le fluorure, l'iode et le sélénium. C'est pourquoi la qualité de l'eau potable est un problème de santé universel, d'autant plus dans les pays en développement.

## 1. Structure de l'eau

L'atome d'oxygène possède 6 électrons périphériques. Sa valence (nombre de liaisons) est égale à 2. L'hydrogène possède un électron périphérique et établit une liaison de covalence (Figure 1).



**Figure 1** : Structure de la molécule d'eau.

L'oxygène étant beaucoup plus électronégatif que l'hydrogène, le doublet d'électrons de chaque liaison O-H se déplace donc vers l'atome d'oxygène. Cela se traduit par un excédent de charges négatives sur l'atome d'oxygène (d'où l'apparition de 2 charges négatives partielles notées d-) et un déficit sur l'atome d'hydrogène (d'où l'apparition de 2 charges positives partielles notées d+, la molécule étant électriquement neutre). On dit que les deux liaisons O-H sont polarisées.

La molécule d'eau est donc polaire (on dit aussi dipolaire). Elle constitue un dipôle électrique permanent (un dipôle électrique étant l'ensemble de deux charges égales et de signes contraires à une distance fixe l'une de l'autre). Cela explique qu'elle soit un bon solvant pour les électrolytes solides, liquides ou gazeux (ex : pour les molécules polaires comme HCl ou pour les solides ioniques cristallins comme le sel). En effet, l'eau peut dissoudre tous les solides ioniques cristallins, conduisant à des solutions comportant des ions solvatés. C'est pourquoi l'eau intervient dans de nombreux phénomènes géologiques.

## 2. Propriété physique

L'eau, en raison de son point d'ébullition élevé, existe principalement sous sa forme liquide dans la gamme des environnements où la vie s'épanouit, bien que les deux autres phases, la glace et la vapeur, jouent un rôle essentiel dans la formation de l'environnement. La chaleur spécifique élevée et la chaleur de vaporisation de l'eau ont des conséquences importantes pour les organismes au niveau cellulaire et physiologique, en particulier pour l'efficacité des processus impliquant le transfert de chaleur, la régulation de la température, le refroidissement, etc. La viscosité est le paramètre majeur de l'eau qui détermine comment les molécules et les ions rapides peuvent être transportés et à quelle vitesse ils diffusent en solution aqueuse. Il fournit ainsi une limite supérieure physique aux taux de nombreux événements au niveau moléculaire, au sein desquels les organismes doivent vivre et évoluer. Ceux-ci incluent les taux de conductance des canaux ioniques, l'association de substrats avec des enzymes, les taux de liaison et les taux d'assemblage macromoléculaire. Il fixe également une limite supérieure à l'échelle de longueur sur laquelle les processus biologiques peuvent se produire uniquement par diffusion. Dans de nombreux cas, par exemple dans les réactions enzyme-substrat, l'évolution a poussé les composants des systèmes vivants aux limites fixées par la viscosité de l'eau.

La tension superficielle élevée de l'eau est pertinente à deux niveaux. Premièrement, en dessous d'une échelle de longueur d'environ 1 mm, les forces de tension superficielle dominent les forces gravitationnelles et visqueuses, et l'interface air-eau devient une barrière effectivement impénétrable. Cela devient un facteur majeur dans l'environnement et le mode de vie des petits insectes, bactéries et autres micro-organismes. Deuxièmement, à l'échelle moléculaire (0,1 à 100 nm), la tension superficielle joue un rôle clé dans les propriétés de solvant de l'eau. La constante diélectrique élevée de l'eau joue également un rôle important dans son action en tant que solvant.

La constante diélectrique est une mesure de la facilité avec laquelle un matériau est polarisé par un champ électrique par rapport au vide. Il est défini par l'amplitude de la polarisation diélectrique (moment dipolaire par unité de volume) induite par un champ unitaire. Les propriétés physiques de l'eau sont illustrées dans le tableau 1.

**Tableau 1** : Propriétés physiques de l'eau.

Propriété	Eau
Formule	H <sub>2</sub> O
Poids moléculaire (g.mol <sup>-1</sup> )	18
Densité (kg.L <sup>-1</sup> )	0,998
Point d'ébullition (K)	373
Volume moléculaire (nm <sup>3</sup> )	0,0299
Volume de fusion (nm <sup>3</sup> )	0,0027
Densité liquide maximale (K)	277
Tension superficielle (mN.n <sup>-1</sup> )	72,8
Viscosité (μPa.s)	1002
Constante diélectrique	78,6
Moment dipolaire (Cm.10 <sup>30</sup> )*	6,01

\*Dans la phase gazeuse.

### 3. Activité de l'eau

La conservation des aliments implique l'action entreprise pour maintenir les propriétés ou la nature souhaitées des aliments, dans un laps de temps, afin qu'ils restent sûrs et agréables à consommer. Un produit alimentaire stable peut être développé en appliquant différentes techniques de transformation et en le maintenant dans des conditions appropriées. La détermination de la stabilité des aliments à partir d'une base scientifique plutôt qu'empirique est un défi pour les scientifiques et les ingénieurs en alimentation. L'eau est un élément de base important dans les aliments. Depuis longtemps, l'industrie sait à quel point il est important de contrôler l'eau libre. La mesure de l'activité de l'eau (aw) en constitue la base et fournit des informations importantes sur la qualité d'un produit. L'humidité relative d'équilibre d'un produit, qui est déterminée par sa pression partielle de vapeur d'eau à la surface, dépend des facteurs suivants : Composé chimique ; température ; teneur en eau ; environnement de stockage ; pression absolue et emballage.

L'eau libre dans les produits est conjointement responsable de la croissance d'organismes indésirables tels que des bactéries ou des champignons, qui produisent des « toxines » ou d'autres substances nocives. De plus, des réactions chimiques/biochimiques (par exemple la réaction de Maillard) se produisent de plus en plus et modifient éventuellement les facteurs suivants d'un produit : stabilité microbiologique, stabilité chimique, teneur en protéines et vitamines, couleur,



goût et valeur nutritionnelle, stabilité du composé et durabilité, stockage et emballage, solubilité et texture. Le tableau suivant montre la teneur en eau typique de certains produits alimentaires et catégories :

**Tableau 2 :** Teneur en eau des produits alimentaires.

Aliments	Teneur en eau	Aliments	Teneur en eau
Laitue, tomates	95	Chou, brocoli	92
Carottes, pommes de terre	90	Agrumes	87
Pommes, cerises	85	Volaille crue	72
Viande maigre crue	60	Fromage	37
Pain blanc	35	Salami	30
Conserves	28	Miel	20
Fruits secs	18	Beurre	18
Farine de blé	12	Pâtes sèches	12
Poudre de lait	4	Bière	90
Jus de fruits	87	Lait	87

L'activité de l'eau est une propriété fondamentale des solutions aqueuses, et par définition est le rapport de la pression de vapeur de l'eau dans le substrat ( $p$ ) à celle de l'eau pure à la même température ( $p_o$ ) :

$$a_w = \frac{P}{P_o}$$

L'activité de l'eau est une mesure de l'efficacité avec laquelle l'eau présente peut participer à une réaction chimique (physique). Si la moitié de l'eau est si étroitement liée à une molécule de protéine qu'elle ne pourrait pas participer à une réaction d'hydrolyse, l'activité globale de l'eau serait réduite. L'activité de l'eau ( $a_w$ ) est définie comme où  $P$  et  $P_o$  sont les pressions partielles de l'eau au-dessus de la nourriture et d'une solution pure dans des conditions identiques respectivement. L'eau étroitement liée n'a pas tendance à s'échapper d'un aliment sous forme de vapeur et n'exerce donc aucune pression partielle et a une activité de l'eau effective de zéro. L' $a_w$  est liée aux points d'ébullition et de congélation, à l'humidité relative d'équilibre (ERH) et à la pression osmotique. L'activité de l'eau varie de zéro (eau absente) à 1,0 (eau pure).

Une relation existe donc entre l'humidité relative d'équilibre (ERH) et l'activité de l'eau ( $a_w$ ) puisque les deux sont basés sur la pression de vapeur.

$$a_w = \frac{ERH}{100}$$

L'ERH d'un produit alimentaire est définie comme l'humidité relative de l'air entourant l'aliment à laquelle le produit ne gagne ni ne perd son humidité naturelle et est en équilibre avec l'environnement. La définition des conditions d'humidité dans lesquelles les micro-organismes pathogènes ou d'altération ne peuvent pas se développer est d'une importance primordiale pour la conservation des aliments. Il est bien connu que chaque micro-organisme a une  $a_w$  cristalline en dessous de laquelle la croissance ne peut pas se produire. Le tableau suivant indique l'activité de l'eau de certains aliments.

**Tableau 3 :** Valeurs d'activité de l'eau des aliments.

Aliments	Activité de l'eau
Viandes fraîches	0.98
Fromages	0.97
Conserves	0.88
Salami	0.83
Fruits secs	0.76
Miel	0.75
Pâtes	0.5

#### 4. Comportement de l'eau des solutions lors de la congélation

La congélation préserve la durée de stockage des aliments en les rendant plus inertes et en ralentissant les réactions adverses qui favorisent l'altération de l'aliment et limitent sa durée de conservation. Cependant, un certain nombre de réactions physiques et biochimiques peuvent toujours se produire et beaucoup d'entre elles sont accentuées lorsque les recommandations de manipulation, de production et de stockage ne sont pas respectées.

Afin de préserver la qualité et la sécurité des aliments congelés, les exigences de température existent pour chaque étape majeure de la chaîne du froid. Il est recommandé que des températures alimentaires stables soient maintenues à -18°C ou moins, bien que des exceptions pour de brèves périodes soient autorisées durant le transport ou la distribution locale quand les -

15°C sont permis. Les vitrines des magasins de vente au détail doivent être à -18°C afin d'être en continuité avec les conditions de stockage, et pas plus de -12°C.

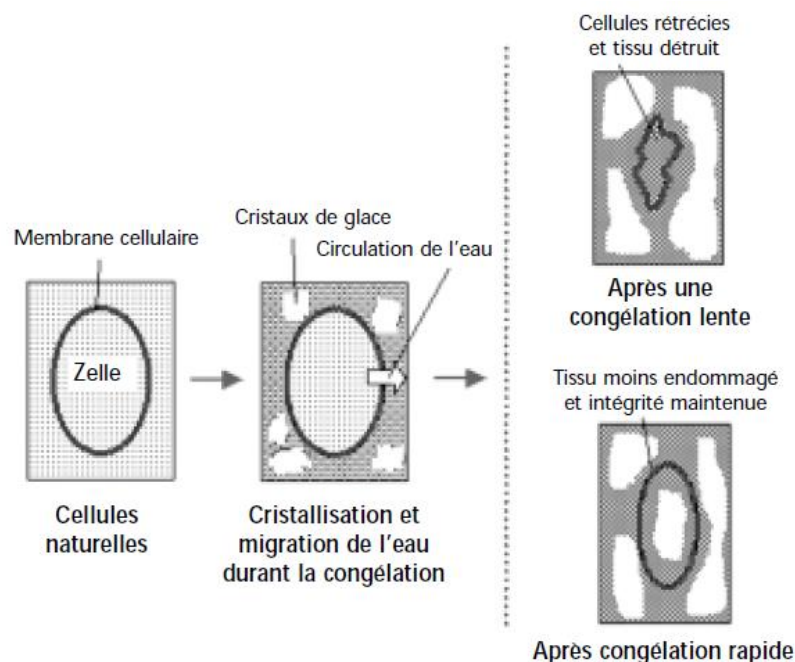
La congélation peut préserver le goût, la texture et la valeur nutritionnelle des aliments mieux que la plupart des autres méthodes pour la conservation à long terme. Cependant, ces qualités dépendent du choix méticuleux des matières des aliments, de l'utilisation de prétraitements appropriés, du choix du réfrigérateur et des options de stockage frigorifique et de l'utilisation d'un emballage adéquat.

Les dommages de la congélation se produisent à la suite d'un certain nombre de mécanismes, ce qui entraîne une perte de qualité dans un produit après la décongélation. Cette altération de la qualité peut être directement observée (ex : brûlure de congélation, décoloration et dommage mécanique), mais dans de nombreux cas, elle ne se voit pas avant la décongélation et la cuisson. La plupart des mécanismes de détérioration sont déterminés par la température de stockage dépendant du temps passé au-dessus de sa valeur recommandée. Ils sont également favorisés par les fluctuations de température. La glace et l'eau peuvent endommager la matière de l'aliment de plusieurs façons, comme :

- Eau non congelée. Même en dessous de -18°C, jusqu'à 10 % de l'eau peut ne pas être congelée et intervenir dans des réactions physiques et biochimiques.
- Dommage dû à la congélation. L'expansion volumétrique de l'eau lorsqu'elle se transforme en glace peut provoquer des dommages structurels à l'aliment. Ceci est souvent la cause de grands vides et de pertes excessives d'exsudat dans les matières congelées après décongélation (Figure 2).
- «Maturation d'Ostwald». C'est la tendance pour les gros cristaux de glace à croître au détriment de cristaux de glace plus petits.
- Accroissement. Réunion de deux cristaux de glace adjacents, entraînant une augmentation de la taille des cristaux de glace et un dommage causé par la congélation.
- Migration de la vapeur et pertes de poids. Ceci est plus visible sur la surface des aliments congelés et peut entraîner des changements associés de l'apparence, de la couleur et de la texture. Ceci est dû aux pressions partielles différentielles des vapeurs d'eau, qui résultent des différences de température entre : (i) la surface du produit et le centre, et (ii) la surface du produit et les évaporateurs des réfrigérateurs.
- Concentration du soluté et déshydratation osmotique. Pendant la formation de glace, la concentration des solutés dans la fraction d'eau non congelée augmente, entraînant une incohérence dans le produit et des dommages au niveau des membranes cellulaires. L'eau

et les solutés peuvent également lessiver les structures cellulaires, provoquant une perte de turgescence et des dommages internes.

La plupart des effets adverses ci-dessus peuvent être minimisés grâce à la congélation rapide et en maintenant des températures suffisamment basses et constantes au cours du stockage en mode congelé.



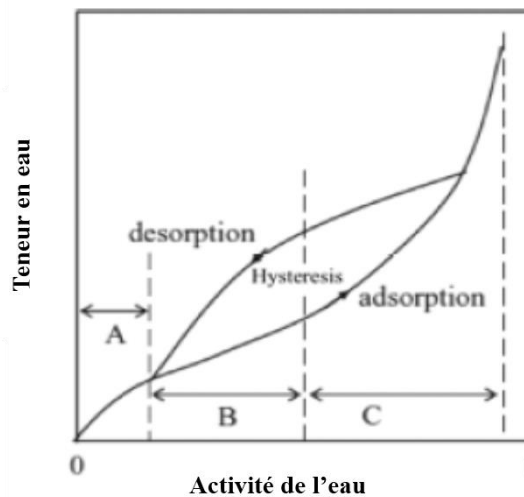
**Figure 2 :** Impact crucial du niveau de congélation sur la qualité du produit final.

## 5. Les isothermes d'adsorption

L'isotherme de sorption alimentaire décrit la relation thermodynamique entre l'activité de l'eau et l'équilibre de la teneur en humidité d'un produit alimentaire à température et pression constantes. La connaissance et la compréhension des isothermes de sorption sont très importantes en science et technologie alimentaires pour la conception et l'optimisation des équipements de séchage, la conception des emballages, les prévisions de qualité, de stabilité, de durée de conservation et pour le calcul des changements d'humidité pouvant survenir pendant le stockage.

Plusieurs procédés de conservation ont été développés afin de prolonger la durée de conservation des produits alimentaires en diminuant la disponibilité de l'eau pour les micro-organismes et en inhibant certaines réactions chimiques. La forme typique d'une isotherme reflète la manière dont l'eau se lie au système. Des interactions plus faibles avec les molécules d'eau génèrent une plus grande activité de l'eau, ainsi, le produit devient plus instable. L'activité de l'eau dépend de la composition, de la température et de l'état physique des composés.

L'adsorption d'eau par les produits alimentaires est un processus dans lequel les molécules d'eau se mélangent progressivement et de manière réversible aux solides alimentaires par chimisorption, adsorption physique et condensation multicouche. Une isotherme peut être typiquement divisée en trois régions ; l'eau de la région A représenté de l'eau fortement liée (Figure 3), et l'enthalpie de vaporisation est considérablement plus élevée que celle de l'eau pure. L'eau liée comprend l'eau de structure (eau à liaison H) et l'eau monocouche, qui est sorbée par les groupes hydrophiles et polaires des composants alimentaires (polysaccharides, protéines, etc.). L'eau liée est incongelable et n'est pas disponible pour les réactions chimiques ou comme plastifiant.



**Figure 3 :** Isotherme de sorption pour un produit alimentaire typique, montrant l'hystérésis.

Dans la région B, les molécules d'eau se lient moins fermement que dans la première zone, elles sont généralement présentes dans de petits capillaires. L'enthalpie de vaporisation est légèrement supérieure à celle de l'eau pure. Cette classe d'eau constitutive peut être considérée comme la transition continue de l'eau liée à l'eau libre. Les propriétés de l'eau dans la région C sont similaires à celles de l'eau libre contenue dans les vides, les gros capillaires, les crevasses ; et l'eau dans cette région se lie faiblement aux matières alimentaires. L'isotherme d'adsorption : si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec. L'isotherme de désorption : si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

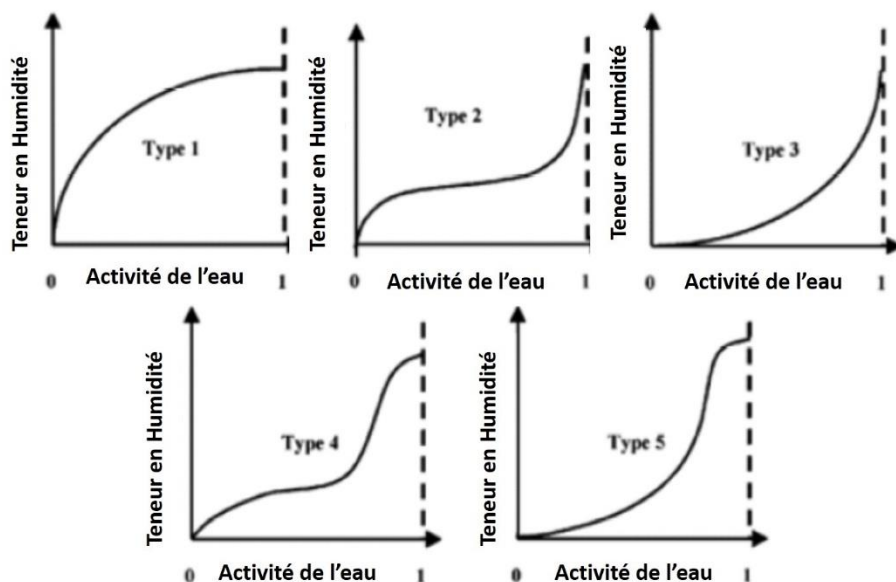
## 6. Phénomènes d'hystérésis des isothermes

Les isothermes de sorption peuvent être générés à partir d'un processus d'adsorption ou d'un processus de désorption ; la différence entre ces courbes est définie comme l'hystérésis,

comme le montre la figure 2. De plus, l'hystérésis est liée à la nature et à l'état des composants des aliments, reflétant leur potentiel de réarrangements structuraux et conformationnels, ce qui altère l'accessibilité des sites polaires énergétiquement favorables. La présence de capillaires dans les aliments entraîne une diminution considérable de l'activité de l'eau.

## 7. Isotherme de sorption dans les I.A.A.

Brunauer et al., 1940 ont classé les isothermes de sorption selon leur forme et leurs processus, en établissant cinq types différents ; comme le montre la figure 4. Type 1 : isothermes similaires qui présentent une augmentation caractéristique de l'activité de l'eau liée à l'augmentation du taux d'humidité ; la dérivée première de ce graphique augmente avec la teneur en eau et les courbes sont convexes vers le haut. Ce type d'isotherme de sorption est généralement applicable dans le processus de remplissage de la couche monomoléculaire d'eau à la surface interne d'un matériau. Type 2 : isothermes de sorption sigmoïdes, dans lesquels les courbes sont concaves vers le haut ; elle prend en compte l'existence d'empilements à la surface interne d'un matériau. Type 3 : connu sous le nom d'isotherme de Flory-Huggins, il représente un solvant ou un plastifiant tel que le glycérol au-dessus de la température de transition vitreuse. Type 4 : il décrit l'adsorption d'un solide hydrophile gonflable jusqu'à ce qu'un maximum d'hydratation du site soit atteint. Type 5 : l'isotherme d'adsorption multicouche Brunauer-Emmett-Teller (BET), c'est celle observée dans l'adsorption de vapeur d'eau sur charbon de bois et elle est liée aux isothermes de type 2 et 3. Les deux isothermes les plus fréquemment retrouvées dans les produits alimentaires sont les types 2 et 4.



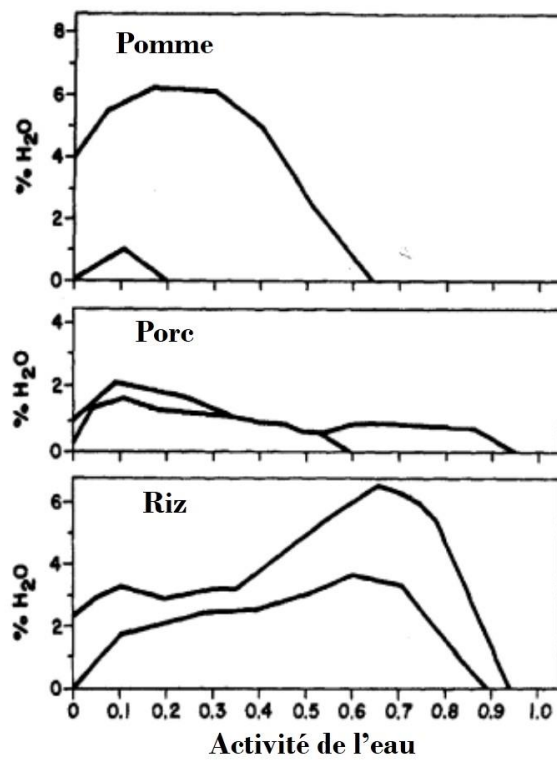
**Figure 4** : Types d'isothermes décrits par Brunauer

Une variété de formes de boucles d'hystérésis a été observée dans les systèmes alimentaires. Il a été signalé de grandes différences dans l'ampleur, la forme et l'étendue de l'hystérésis des aliments déshydratés ; les caractéristiques dépendent du type d'aliment et de la température. Les variations peuvent être regroupées en trois catégories générales, comme le montre la figure 5.

- Aliments riches en sucre et en pectine - ce phénomène est prononcé dans la région à faible teneur en humidité;
- Aliments riches en protéines - l'hystérésis commence à une activité de l'eau élevée, dans la région de condensation capillaire, et s'étend sur l'isotherme jusqu'à une activité de l'eau nulle ;
- Féculents-une grande boucle est signalée, avec l'écart maximum entre les courbes se produisant à environ  $a_w$  0,7 (ou dans la région de condensation capillaire).

Des recherches ont indiqué une diminution de l'hystérésis totale et une portée de boucle limitée le long des isothermes développées à des températures élevées. Il a été trouvé une hystérésis dans le sucre contenant de l'amidon jusqu'à une activité de l'eau de 0,6, et jusqu'à 0,3 dans les raisins secs (teneur en sucre très élevée). Des chercheurs ont observé une hystérésis significative inférieure à 0,5-0,6 dans les fruits, et suggéré que l'absence d'hystérésis à haute température était due à la dissolution des sucres. De plus, une diminution de l'amplitude de l'hystérésis était corrélée avec l'augmentation de la température pour le porc, la pomme et le riz.

La connaissance des propriétés de sorption des aliments est d'une grande importance dans la déshydratation des aliments, en particulier dans l'approche quantitative de la prédiction de la durée de conservation des aliments séchés. Les équations de modélisation des isothermes de sorption de l'eau présentent un intérêt particulier pour de nombreux aspects de la conservation des aliments par déshydratation, y compris l'évaluation des fonctions thermodynamiques de l'eau sorbée dans les aliments. La connaissance des propriétés thermodynamiques associées au comportement de sorption de l'eau dans les aliments est importante pour la déshydratation à plusieurs égards, en particulier dans la conception et l'optimisation du fonctionnement de l'unité.



**Figure 5 :** Exemples d'hystérésis de sorption dans les aliments



## Chapitre 2 : Les systèmes protéiques

Les protéines sont des macromolécules constituées d'un enchaînement d'acides aminés dont la séquence est dictée par le code génétique pour chacune d'elles. Les acides aminés utilisés pour la synthèse des protéines des organismes vivants sont au nombre de 20. Les protéines peuvent subir des modifications post-traductionnelles conduisant à la fixation d'autres composés sur la chaîne polypeptidique (glucides, lipides, métaux, phosphore, ...). Les protéines de l'organisme sont en renouvellement constant, l'équilibre dynamique entre la protéosynthèse et la protéolyse étant chez l'homme adulte de l'ordre de  $250-300 \text{ g.j}^{-1}$ , soit 2,5 % environ de la masse protéique totale. Ces protéines sont impliquées dans toutes les grandes fonctions physiologiques (structure des tissus, activités enzymatiques, hormones, anticorps, ...).

Les protéines sont un composant indispensable de l'alimentation. On les trouve dans les produits d'origine animale, les produits d'origine végétale et les organismes unicellulaires. Elles sont présentes à des teneurs très variables dans les sources alimentaires, ce qui est à l'origine de différences de niveaux de consommation marquées selon les populations. En outre, le développement des techniques d'extraction met à disposition des filières de l'alimentation un nombre croissant d'ingrédients à teneur élevée en protéines d'origine animale et végétale. Leur utilisation dans la formulation des aliments pourrait conduire à des modifications quantitatives et qualitatives de la part des protéines dans les aliments dont les conséquences devront être évaluées.

### 1. Propriétés physiques des protéines

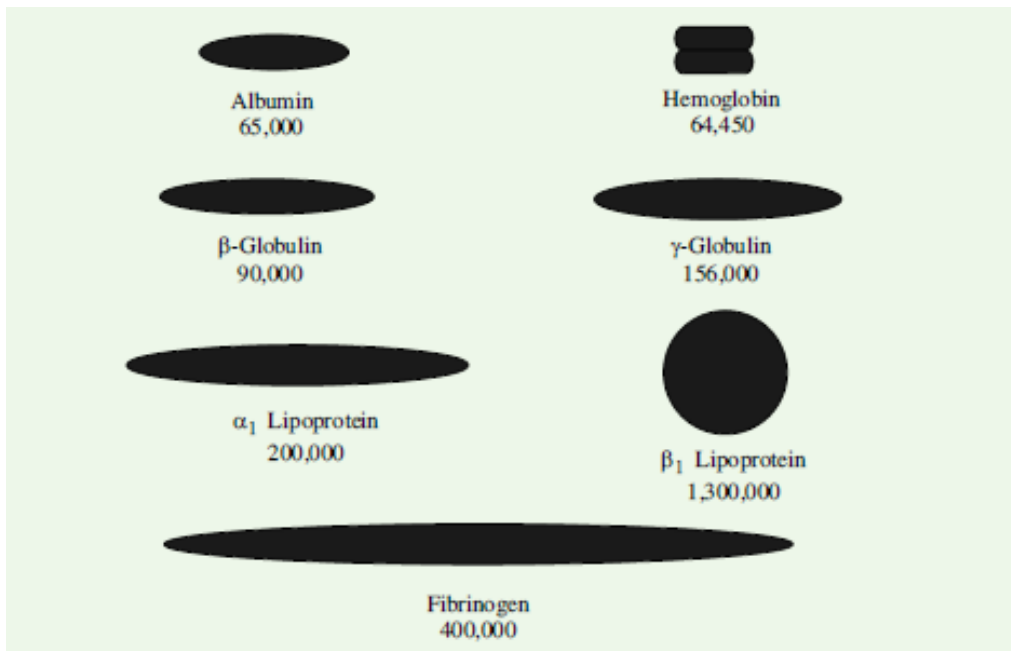
*Couleur et goût* : Les protéines sont incolores et généralement insipide. Ceux-ci sont homogènes et cristallins.

*Forme et taille* : Les protéines varient en forme de simples structures sphériques cristalloïdes à de longues structures fibrillaires. Deux modèles distincts de forme ont été reconnus:

- *Protéines globulaires* : Elles sont de forme sphérique et se trouvent principalement dans les plantes, en particulier dans les graines et les cellules des feuilles. Ce sont des faisceaux formés par pliage et froissement de chaînes protéiques. Par exemple, la pepsine, l'édestine, l'insuline, la ribonucléase, etc.
- *Protéines fibrillaires* : elles sont de forme filiforme ou ellipsoïdale et se produisent généralement dans les muscles des animaux. La plupart des études concernant la structure des protéines ont été menées en utilisant ces protéines. Par exemple, le fibrinogène, la myosine, etc.

Chaque molécule de protéine est caractérisée par sa taille spécifique (Figure 6). Par exemple :

- (a) L'hémoglobine a un diamètre de 55 Å.
- (b) Edestin a un diamètre de 80 Å.
- (c) La catalase a des dimensions de  $80 \times 64 \times 54$  Å (des axes).
- (d) Le fibrinogène humain a un diamètre de 38 Å et une longueur de 700 Å.
- (e) Le collagène est l'une des protéines les plus longues, avec une longueur de 3 000 Å.



**Figure 6** : Dimensions relatives et poids moléculaires de certaines molécules de protéines dans le sang.

En général, les molécules de protéines sont toujours très grosses, comme on peut le voir dans les exemples suivants :

- (a) Gliadine (de blé)— $C_{685}H_{1068}N_{196}O_{211}S_5$
- (b) Zein (de maïs)— $C_{736}H_{1161}N_{184}O_{208}S_3$
- (c) Caséine (du lait)— $C_{708}H_{1130}N_{180}O_{224}S_4P_4$
- (d) Bêta-lactoglobuline (du lait)— $C_{1642}H_{2652}O_{492}N_{420}S_{18}$

*Poids moléculaire* : La taille extraordinaire, la faible stabilité, les conditions de solubilité spécifiques et la réactivité élevée ont rendu la détermination du poids moléculaire des protéines une tâche difficile. Cependant, les protéines ont généralement des poids moléculaires élevés compris entre  $5 \times 10^3$  et  $1 \times 10^6$ . On peut noter que les valeurs des poids moléculaires de nombreuses protéines sont proches ou multiples de 35 000 et 70 000. Auparavant, cela était interprété comme une régularité sous le nom de règle de Svedberg. En outre, il a ensuite été supposé que les protéines sont composées d'unités de poids moléculaire 17 500. Cela correspond à environ 145-150 résidus d'acides aminés, puisque le poids moléculaire moyen d'un résidu d'acide aminé s'élève à environ 115-120.

Le nombre approximatif de résidus d'acides aminés dans une protéine simple n'ayant pas de groupe prothétique peut être calculé en divisant son poids moléculaire par 110. Le poids moléculaire moyen des 20 acides aminés est d'environ 138. Mais comme les acides aminés les plus petits prédominent dans la plupart des protéines, par conséquent, le poids moléculaire moyen d'un acide aminé est plus proche de 128. Puisqu'une molécule d'eau ( $MW = 18$ ) est éliminée pour produire chaque liaison peptidique, le poids moléculaire moyen du résidu d'acide aminé est d'environ  $128 - 18 = 110$ .

*Nature colloïdale* : En raison de leur taille géante, les protéines présentent de nombreuses propriétés colloïdales, telles que :

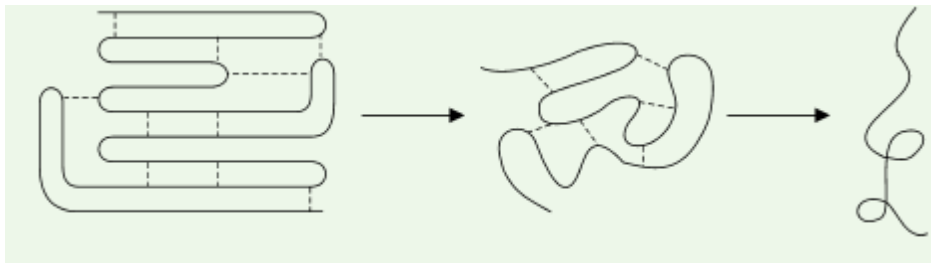
- Leurs vitesses de diffusion sont extrêmement lentes.
- Ils peuvent produire une diffusion considérable de la lumière en solution, entraînant ainsi une turbidité visible (Effet Tyndall).

*Dénaturation* : La dénaturation fait référence aux changements dans les propriétés d'une protéine. En d'autres termes, il s'agit de la perte d'activité biologique. Dans de nombreux cas, le processus de dénaturation est suivi d'une coagulation - un processus où les molécules de protéines dénaturées ont tendance à former de gros agrégats et de précipiter de la solution.

La dénaturation peut être provoquée par une variété d'agents, à la fois physiques et chimiques. Les agents physiques comprennent des actions mécaniques (comme des secousses), des traitements thermiques, des opérations de refroidissement et de congélation, des frottements, des pressions hydrostatiques élevées (5 000 à 10 000 atm.), des rayons ultraviolets, etc. Les agents chimiques, qui provoquent la dénaturation, sont de nombreux rayonnements ionisants (comme les rayons X, les rayonnements radioactifs et ultrasonores), les solvants organiques (acétone, alcool), les anions aromatiques (salicylates), certains détergents anioniques (comme le dodécyl sulfate de

sodium), etc. Un exemple courant de protéine facilement dénaturée par agitation ou chaleur est l'albumine de blanc d'œuf.

Il a été suggéré par Wu (1931) que la dénaturation conduit principalement au dépliement de la chaîne peptidique, provoquant ainsi une désorganisation de la structure interne de la protéine (Figure 7). Ceci est démontré par le fait que les protéines dénaturées sont plus facilement hydrolysées.



**Figure 7** : Représentation de la dénaturation d'une protéine.

Lorsque les chaînes peptidiques ou les molécules protéiques sont déroulées, certaines liaisons se séparent et de nouveaux sites de faisceaux sont exposés à l'action de certaines enzymes protéolytiques provoquant l'hydrolyse. Ainsi, les liaisons H liant les 2 chaînes peptidiques sont en partie libérées et les liaisons disulfure (-S-S-) liant également les deux chaînes peptidiques se dédoublent pour donner les groupes sulfhydryle (-SH) libres.

Selon Putnam (1953), les protéines, lors de la dénaturation, subissent les modifications suivantes :

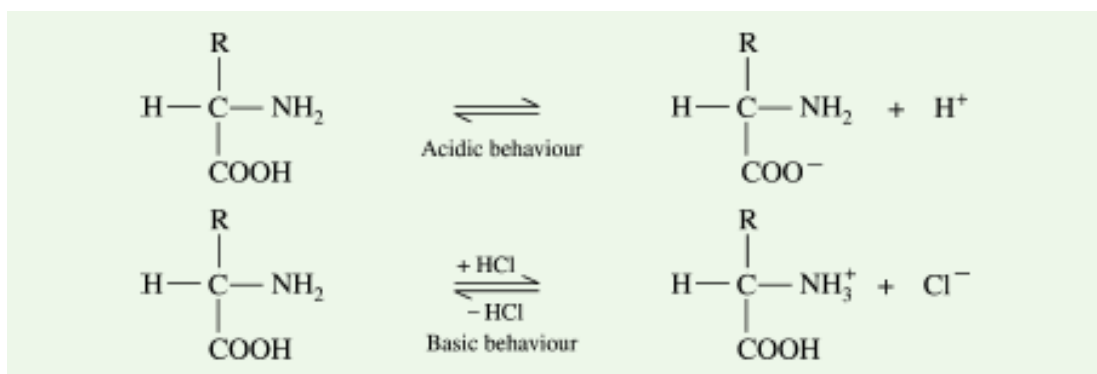
1. Diminution de leur solubilité.
2. Cessation de leur activité biochimique en tant qu'enzymes ou hormones.
3. Diminution de la taille et de la forme de la molécule.
4. Augmentation de l'activité de certains radicaux présents dans la molécule tels que le groupe -SH de la cystéine, la liaison -S-S- de la cystine et le groupe phénolique de la tyrosine.

En outre, lors de la dénaturation, de nouveaux groupes ionisables deviennent disponibles pour le titrage acido-basique et il se produit également un changement de rotation optique dans le sens d'une augmentation de lévrotation. La dénaturation entraîne également une altération de la tension superficielle et une perte d'antigénécité.

Certaines protéines, lorsqu'elles sont dénaturées, ne peuvent pas être ramenées à leur état d'origine. Dans ce cas, la dénaturation est décrite comme de type « irréversible ». D'autre part, la

dénaturation dans d'autres protéines est de type « réversible ». Par exemple, si la trypsine est exposée à une température de 80-90°C, elle se dénature et lorsque cette solution est refroidie à 37°C, la solubilité et l'activité de cette protéine-enzyme sont retrouvées. Le processus de récupération des propriétés normales des protéines par une protéine dénaturée est appelé **renaturation** ou **repliement**. Lors de la renaturation, certains anticorps peuvent provoquer un reroulement des faisceaux de protéines de sorte que la plupart des liaisons d'origine soient récupérées. La récupération de la protéine renaturée n'est cependant jamais complète.

*Nature amphotère* : Comme les acides aminés, les protéines sont amphotères, c'est-à-dire qu'elles agissent à la fois comme des acides et des alcalis (Figure 8). Ceux-ci migrent dans un champ électrique et la direction de la migration dépend de la charge nette possédée par la molécule.



**Figure 8** : Nature amphotère des acides aminés (et des protéines).

La charge nette est influencée par la valeur du pH. Chaque protéine a une valeur fixe de point isoélectrique (pI) auquel elle se déplacera dans un champ électrique. Le point isoélectrique (ou point isoionique) est la valeur du pH à laquelle le nombre de cations est égal à celui des anions. Ainsi, au point isoélectrique, la charge électrique nette d'une protéine est toujours nulle. Mais la charge totale sur la molécule de protéine (somme des charges positives et négatives) à ce stade est toujours maximale. Ainsi, les protéines sont des ions dipolaires ou des sels internes ou des zwitterions en point isoélectrique et existent en solution sous la forme :  $(\text{H}_3\text{N}^+)_m\text{—R—}(\text{COO}^-)_n$ .

A des valeurs de pH inférieures à pI, la protéine aura une charge nette positive et, en tant que cation, migrera vers le pôle négatif (cathode). De même, à des valeurs de pH supérieures à pI, la protéine aura une charge nette négative et, en tant qu'anion, se déplacera vers le pôle positif (anode).

On peut affirmer en général que ces protéines ayant un excès de groupes carbonyle auront tendance à avoir un pI plus faible tandis que celles ayant un excès de groupes amines auront

tendance à avoir un pI plus élevé. La pression osmotique et la viscosité de la solution protéique sont minimales au point isoélectrique. Au point isoélectrique également, les protéines sont les moins solubles et peuvent être précipitées plus facilement.

*Capacité de liaison ionique* : Étant de nature amphotère, les protéines peuvent former des sels avec des cations et des anions en fonction de leur charge nette. En fait, un mélange de différentes protéines à un pH donné (sauf à pI) comprendra à la fois des cations et des anions et les sels des combinaisons protéine-protéine seront formés. Cela se produit dans les tissus car des protéines acides et basiques sont présentes.

De nombreux ions forment des sels insolubles avec les protéines et servent d'excellents agents de précipitation pour les protéines. Par exemple, les anions de certains acides comme phosphotungstique, trichloracétique, picrique etc., forment des sels insolubles avec les protéines lorsque ces dernières se comportent comme des cations (côté acide de leur pI).

Les métaux lourds sont utilisés pour précipiter les protéines du côté alcalin de leur pI, les protéines se comportant comme des anions. Des ions de Hg, Cu, Ag, Zn, etc., sont fréquemment utilisés à cette fin. De nombreux colorants acides trouvent une utilisation pratique pour colorer les protéines insolubles comme la soie et la laine.

*Solubilité* : La solubilité des protéines est fortement influencée par le pH. La solubilité est la plus faible au point isoélectrique et augmente avec l'augmentation de l'acidité ou de l'alcalinité. En effet, lorsque les molécules de protéines existent sous forme de cations ou d'anions, les forces de répulsion entre les ions sont élevées, car toutes les molécules possèdent des charges en excès du même signe. Ainsi, ils seront plus solubles qu'à l'état isoélectrique.

- Effet de « salage » : Les globulines sont peu solubles dans l'eau mais leur solubilité est fortement augmentée par l'ajout de sels neutres comme le NaCl. Ce phénomène est communément appelé effet de « salage ».
- Effet « relargage ». Les protéines sont précipitées à partir d'une solution aqueuse par de fortes concentrations de sels neutres. C'est le processus de "relargage". Les ions divalents et trivalents sont plus efficaces que les ions univalents. Les sels couramment utilisés à cette fin sont  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , les sels de magnésium et les phosphates.
- Précipitation isoélectrique : Certaines protéines comme la caséine du lait, cependant, sont facilement précipitées à ou près de leur point isoélectrique. Ce processus est donc décrit comme une précipitation isoélectrique.

*Activité optique* : Toutes les solutions de protéines font pivoter le plan de la lumière polarisée vers la gauche, c'est-à-dire qu'elles sont lévrotatoires. Par exemple, la rotation spécifique  $[\alpha]_D$  pour l'ovalbumine est proche de  $-30^\circ$  sur la plage de pH entre 3,5 et 11. Cependant, à des valeurs de pH inférieures ou supérieures, la rotation devient plus négative, par exemple, à pH 13, le  $[\alpha]_D$  est d'environ  $-60^\circ$ . La rotation est encore augmentée en soumettant les protéines à des températures élevées.

## 2. Extraction des protéines alimentaires

### *Extraction assistée par enzyme*

Ces dernières années, il y a eu un intérêt croissant pour l'utilisation d'enzymes dans l'extraction de protéines, principalement à des fins alimentaires et nutraceutiques. Les enzymes sont des protéines globulaires provenant de micro-organismes, de plantes, d'animaux et d'humains, fonctionnant comme un catalyseur. À dessein dans les produits laitiers (fromage, yaourt), la boulangerie (fabrication du pain) et la transformation de la viande, les enzymes sont de plus en plus utilisées. En fait, maintenant, une gamme d'enzymes de qualité alimentaire est également disponible dans le commerce. Les enzymes couramment utilisées dans l'industrie à l'heure actuelle comprennent la carbohydrase, la lipase et principalement les protéases. Le tableau 4 donne un aperçu du profil de chaque enzyme qui est décrit brièvement dans cette section et qui est couramment utilisé dans le processus d'extraction assistée par enzyme.

**Tableau 4** : Application de l'extraction assistée par enzyme à partir de sources de protéines.

Enzyme	Type de l'enzyme	Source
Pepsine	Endopeptidase	Volaille (Foie)
Alcalase		
Thermolysine	Metallopeptidases	Bovin (Foie)
Papaine	Endopeptidases,	Porcin (foie)
Alcalase	Aminopeptidases,	
Trypsine	Dipeptidyl peptidases	
Protex 40XL, Protex P, and Protex 5L	Endopeptidase	Farine de colza

**Tableau 4 (Suite)**

Enzyme	Type de l'enzyme	Source
Pectinase B-glucanase	Carbohydases	Farine de colza
Alcalase	Endopeptidase	Déchets de poisson maquereau
Pepsine Alcalase	Endopeptidase	Quinoa
Viscozyme	Carbohydases	Okara (lait de soja)
Neutrase	Protéase bactérienne	Feuilles de thé
Alcalase	Endopeptidase	
Protamex Flavorzyme	Complexe de protéinase de Bacillus Aspergillus oryzae	
Cellulase	Carbohydases	Riz
Hemicellulase Pectinex Ultra Viscozyme Alcalase	Endopeptidase	

Le processus extraction assistée par enzyme est considéré comme un processus respectueux de l'environnement, dans lequel il remplace les étapes qui incluent des conditions chimiques ou physiques difficiles par des enzymes. Les constituants des protéines des déchets alimentaires sont complexes et les protéines coexistent fréquemment avec la pectine, l'amidon, la cellulose et souvent les lipides dans les cellules. Ces impuretés peuvent diminuer les rendements d'extraction des protéines. Par conséquent, au cours de l'extraction assistée par enzyme, la rupture cellulaire est l'une des étapes les plus pertinentes pour libérer la protéine des compartiments cellulaires internes sous une forme soluble. L'extraction assistée par enzyme permet également l'extraction réussie d'acides aminés tels que la glutamine et l'asparagine, généralement facilement détruits à la suite de l'hydrolyse acide et alcaline.

L'application de l'extraction assistée par enzyme dépend des conditions opérationnelles, y compris le rapport substrat/enzyme, la température et le pH spécifiques à l'enzyme et le temps d'extraction. De plus, les isolats de protéines sont généralement produits par précipitation au point isoélectrique à partir (a) de sources animales (produits laitiers et fruits de mer) et (b) de tourteaux



de légumineuses pressées dégraissées (y compris le soja, les légumineuses et les arachides). Ces isolats de protéines, en raison de leurs principaux paramètres fonctionnels, ont été utilisés comme émulsifiants, stabilisants et agents moussants, ainsi que comme fortifiants pour améliorer la valeur nutritionnelle du produit final. Outre l'extraction de protéines entières, la production d'hydrolysats à partir d'isolats de protéines est de plus en plus utilisée. L'hydrolyse enzymatique des protéines présente plusieurs avantages, tels qu'une solubilité plus élevée et des peptides plus petits.

L'extraction assistée par enzyme est réalisée à l'échelle du laboratoire et présente des limitations commerciales et techniques potentielles, notamment (a) des coûts d'enzyme non économiques ; (b) la spécificité actuelle des enzymes est limitée, par exemple l'hydrolyse partielle des parois cellulaires végétales ; et (c) les enzymes dépendent de certains facteurs environnementaux (température d'incubation, disponibilité du substrat et pH). Le problème majeur avec l'application d'enzymes dans une configuration industrielle est le coût opérationnel, avec 28% à 30% associé aux matières premières. La synthèse de nouvelles enzymes ainsi que la purification de mélanges enzymatiques pourraient aider à réduire les coûts.

### ***Extraction assistée par cavitation***

Il existe un intérêt croissant pour les nouvelles techniques, telles que l'extraction assistée par cavitation (CAE) comme alternative aux méthodes conventionnelles non vertes (reflux, percolation, macération à l'aide de solvants organiques). Comme indiqué, le processus CAE s'ajoute à « (a) l'augmentation de la température et de la pression entraînant un taux de transfert de masse élevé ; (b) une diffusion et une implosion améliorées des bulles d'agitation ; (c) élargissement des pores ; et (d) la production de radicaux libres extrêmement réactifs aidant à la rupture des cellules. Actuellement, le CAE est l'un des domaines les plus étudiés, principalement en raison de ses avantages rentables et de son avenir pour l'exécution à grande échelle. Deux techniques d'CAE largement utilisées sont discutées ici : (a) l'extraction assistée par ultrasons (UAE) et (b) l'extraction par cavitation hydrodynamique (HCE) ou plus communément appelée traitement à haute pression. Le tableau 5 illustre l'application de diverses techniques CAE pour l'extraction de protéines à partir de sources alimentaires.

L'efficacité des UAE est liée et dépendante des caractéristiques de traitement, y compris les facteurs communs tels que la température et les caractéristiques du solvant, ainsi que le type de réacteur à ultrasons (bain ou sonde), la fréquence de sonication de fonctionnement et la puissance. L'eau est préférée et elle est principalement utilisée pour l'extraction des glucides, des glycosides et des acides aminés par rapport aux solvants organiques et autres solvants inorganiques. La recherche utilisant l'application HCE a été limitée à l'émulsification, à la rupture

des cellules et à l'attendrissement de la viande. Le mécanisme est assez similaire à celui de l'UAE. Cependant, la seule différence concerne la température et la pression. Dans le traitement sous pression, la cavitation hydrodynamique est produite en faisant passer un liquide à travers un petit orifice. Contrairement aux UAE, HCE est plus facile à mettre à l'échelle et à utiliser dans un processus continu à une échelle commerciale. De plus, l'intensité d'effondrement de la cavitation dans HCE est inférieure à celle des UAE. Cependant, le nombre de cavités générées est plus important dans le HCE, créant un volume total plus important de l'effondrement de la cavité, ce qui rend le HCE plus efficace que l'UAE.

**Tableau 5** : Application de diverses extractions assistées par cavitation (CAE) à partir de sources de protéines alimentaires.

Objectif de cavitation	Type de cavitation
Extraction de protéines à partir de son de riz dégraissé	UAE
Extraction de protéines de soja	UAE
Oxydation et structure des protéines de bœuf	UAE
Propriétés physicochimiques et antioxydantes des hydrolysats de protéines de maïs	UAE
Extraction des protéines de soja	UAE
Extraction de protéines à partir de tourteau de tournesol	UAE
Extraction de protéines de germe de blé	UAE
Extraction de protéines à partir de drêches de brasserie	UAE
Extraction d'albumine à partir de farine de graines de courge dégraissée	UAE
Protéines et glucides des graines de soja	UAE
Techniques de transformation du bœuf	HCE
Hydrolysats d'hémoglobine de viande porcine	HCE
Agrégation de protéines	HCE
Extraction d'isolats de protéines de soja	HCE et UAE

UAE : extraction assistée par ultrasons ; HCE : extraction par cavitation hydrodynamique.

### ***Processus MAE***

L'application du MAE, qui a commencé à la fin des années 1980, a été reconnue comme une technologie d'extraction rentable remarquable dans l'industrie alimentaire. Le succès du processus MAE est attribué à la destruction de la paroi cellulaire par les collisions continues de molécules d'eau dans la matrice, entraînant l'exsudation (libération) des composants dans les cellules dans le milieu solvant environnant.

Le MAE a été utilisé pour un certain nombre de raisons, notamment la solubilisation des polysaccharides de la paroi cellulaire, l'inactivation des enzymes et l'amélioration de la qualité nutritionnelle. Le processus MAE dépend de facteurs internes et externes, notamment la structure de la matrice (épaisseur de la paroi cellulaire), le type de solvant, le rapport volume (solide/solvant) et la pression, la durée et la température de traitement par micro-ondes. L'extraction de la protéine de son de riz en utilisant le procédé MAE a montré une augmentation du rendement en protéines d'environ 1,54 fois par rapport à l'extraction alcaline.

### ***Procédé d'extraction supercritique***

Les recherches sur l'utilisation de l'extraction supercritique dans le traitement des déchets bio-organiques prennent de l'ampleur. L'eau supercritique est universellement connue comme une alternative puissante contre les méthodes conventionnelles d'extraction de protéines. Cette technique d'extraction utilise des traitements à l'eau chaude à haute pression (100 et 374 °C). Lorsque la température de l'eau augmente jusqu'à 250 °C, elle permet la dissolution du complexe hydrophobe. Cela est principalement dû à la diminution de la constante diélectrique relative de 80 à 27. De plus, même en l'absence de catalyseur externe, les protéines et les glucides peuvent être hydrolysés dans l'eau supercritique.

Une autre étude a décrit l'utilisation d'acétone aqueuse. Les résultats de l'étude expliquaient une relation entre la concentration de solvant et la teneur en protéines, de sorte que la teneur en protéines augmentait avec l'augmentation de la concentration d'acétone jusqu'à 40 % seulement. Une augmentation de la solubilité de la protéine de son de riz est observée en raison de l'hydrolyse de grosses protéines insolubles en peptides plus petits.

### ***Champ électrique pulsé***

Le champ électrique pulsé (PEF) est une technique de traitement basée sur l'électricité (non thermique). Même si la conception du PEF a été introduite de manière pragmatique il y a environ 50 ans, le PEF peut toujours être considéré comme une technologie prometteuse principalement en raison des développements modernes dans les applications industrielles (alimentaires). La

technologie PEF présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes d'extraction thermique, car elle préserve la valeur nutritionnelle, la saveur, la texture et la couleur.

L'objectif actuel de la technique PEF est principalement (a) tuer les micro-organismes de manière non thermique et (b) la rupture des cellules, pour l'amélioration de l'extraction des métabolites. Le mécanisme fondamental du PEF est la génération d'impulsions courtes de champs électriques élevés (10 à 80 kV/cm) avec des intervalles variant de la microseconde à la milliseconde. Les mécanismes les plus reconnus pour la séparation induite par le PEF sont la perturbation électrique de la membrane cellulaire ou l'électroporation de la membrane cellulaire. L'électroporation basée sur l'intensité du champ peut être inversée de manière réversible ou complète. Le PEF augmente la perméabilisation sans aucun effet désavantageux.

### *Procédés d'extraction hybrides*

La solubilité est un indicateur de l'extractibilité des protéines. En général, l'extraction des protéines commence à un pH plus éloigné du point isoélectrique en solubilisant la protéine, qui précipite ensuite en facilitant l'extraction. L'effet du pH sur l'extraction des protéines est influencé par les altérations de la paroi cellulaire et le changement des propriétés des protéines. L'extraction à l'acide semble inefficace dans la dégradation de la paroi cellulaire, principalement en raison du fait que le pH acide appliqué est plus proche du point isoélectrique de la protéine que celui des expériences alcalines. Cela signifie que la solubilité des protéines est faible en raison d'une charge nette moindre. L'autre approche consiste à solubiliser les protéines à l'aide de solutions salines par ultrafiltration et diafiltration. L'ajout d'acide trichloracétique à l'acétone pourrait augmenter la concentration en protéines et améliorer l'élimination des contaminants. En outre, des méthodes mécaniques peuvent être appliquées pour l'extraction de protéines qui entraînent une perturbation des cellules par des contraintes de cisaillement et/ou des forces d'impact dues à la collision de billes.

### **3. Les protéines des œufs**

L'œuf peut être défini comme une source peu énergétique de protéines parfaitement équilibrées et de lipides de très bonne digestibilité, assurant par ailleurs 20 à 30 % du besoin journalier de l'homme en de nombreux minéraux et vitamines (pour 100 g d'œuf).

L'œuf de poule sans coquille contient 74,4 % d'eau et deux séries de nutriments majeurs : des protéines (12,3 % ; 6,7 g/œuf, soit 30 % du besoin quotidien de l'homme/100 g d'œuf) et une quantité équivalente de lipides (11,9 %). Les protéines sont réparties équitablement entre le blanc

et le jaune d'œuf. Les protéines du blanc sont pour la plupart des glycoprotéines ; l'ovotransferrine et le lysozyme ont des propriétés antimicrobiennes, alors que d'autres confèrent au blanc d'œuf des propriétés fonctionnelles intéressantes telles que viscosité, thermogélification, propriétés moussantes et émulsifiantes.

Les protéines du blanc d'œuf à l'état cru sont peu digestibles (51 %) du fait de l'activité antitrypsique de l'ovomucoïde. Cette activité est détruite à la cuisson qui permet en outre, en provoquant la coagulation des protéines, une stimulation des sécrétions gastriques et pancréatiques : la digestibilité des protéines du blanc cuit est ainsi presque totale 91-94 %. A l'inverse, une sur-cuisson du jaune diminue la digestibilité de ses lipoprotéines. Comparées à l'ensemble des protéines animales et végétales, les protéines de l'œuf cuit ont une digestibilité très élevée. De plus, leur composition en acides aminés essentiels est parfaitement adaptée aux besoins de l'homme, notamment grâce à une teneur élevée en lysine et acides aminés soufrés. Du fait de cet équilibre parfait, l'organisation mondiale de la santé a choisi l'œuf entier comme source de protéines de référence pour l'enfant (référence 100, donc légèrement supérieure au lait de femme). Lorsque l'on prend en compte la digestibilité des protéines de l'œuf entier et leur valeur biologique (utilisation réelle pour la synthèse protéique), l'œuf est supérieur à toute autre source protéique, respectivement, de 15, 20 et 40 % par rapport au lait de vache, à la viande de bœuf ou aux protéines du blé. Les protéines du jaune de l'œuf peuvent être hydrolysées en peptides et constituent une excellente source d'acides aminés équilibrés pour l'enfant, réduisant en outre le risque d'allergie.

Le blanc d'œuf peut être considéré comme une solution aqueuse de protéines. Moins d'une vingtaine de ces protéines est actuellement identifiée (Tableau 6). Ces protéines présentent par ailleurs des activités biologiques nombreuses et variées.

Le jaune d'œuf est beaucoup plus riche en matière sèche que le blanc et a une composition chimique plus complexe. D'un point de vue structurel, le jaune peut être assimilé à une suspension de particules appelées « granules » dans une solution appelée « plasma ». Le ratio protéines / lipides est très différent entre ces deux fractions : 60 % de protéines et 34 % de lipides dans les granules, contre 20 % de protéines et 80 % de lipides dans le plasma (exprimé en % de l'extrait sec). On distingue essentiellement quatre types de protéines (Tableau 7), dont les 2/3 sont associées à des lipides pour former des lipoprotéines.

**Tableau 6 :** Protéines du blanc d'œuf.

Protéine	% des protéines totales	Activités biologiques
Ovalbumine	54	
Ovotransferrine	12 - 13	Fixe le fer, antimicrobien
Ovomucoïde	11	Inhibiteur trypsique
Ovomucine	1,5 – 3,5	Viscosité, hémagglutination virale
Lysozyme	3,5	Antimicrobien (Gram +)
Globulines G2 et G3	8	
Ovoinhibiteur	0,1 – 1,5	Inhibiteur de protéases à serine
Ovoglycoprotéine	0,5 - 1	
Flavoprotéine	0,8	Fixe la riboflavine (vitamine B2)
Ovomacroglobuline	0,5	Propriétés antigéniques
Cystatine	0,05	Inhibiteur de protéases à SH
Avidine	0,05	Fixe la biotine (vitamine B8)
Ovalbumine gène Y*	5	
HEP21*	Traces	

**Tableau 7 :** Protéines du jaune d'œuf.

Protéines	Localisation	% de l'extrait sec	% des protéines du jaune	Teneur en lipides (%)
LDL	Plasma	68	24	88
Livétines	Plasma	10	30	0
HDL	Granules	16	36	20
Phosvitine	Granules	4	10	0

Du fait des multiples propriétés techno-fonctionnelles, l'œuf est souvent décrit comme un ingrédient polyfonctionnel dont le rôle est central dans de très nombreuses applications culinaires (Tableau 8).

**Tableau 8** : Propriétés techno-fonctionnelles de l'œuf et applications alimentaires.

	<b>Entier</b>	<b>Blanc</b>	<b>Jaune</b>
Biscuiterie	Colorant	Moussant	Emulsifiant
Pâtisserie	Liant		Colorant
Flans ...	Coagulant		
	Moussant		
Confiserie	/	Anticristallisant	/
		Moussant	
Crèmes glacées	Liant	/	Emulsifiant
Charcuterie	Liant	Gélifiant	/
(pâtés...), certains plats préparés (quenelles ...)	Emulsifiant		
Pâtes alimentaires	Colorant	/	/
	Liant		
	Elasticité		
Mayonnaises	/	/	Emulsifiant
Sauces			Viscosité

**Pouvoir coagulant ou gélifiant** : les propriétés gélifiantes de l'œuf sont dues aux protéines qui coagulent sous l'action de divers agents physiques, notamment la chaleur. Dans le blanc (Température de coagulation aux environs de 60°C), l'ovalbumine et l'ovotransferrine sont les principales protéines à l'origine de cette propriété, tandis que dans le jaune (température de coagulation aux environs de 65°C) interviennent la lipovitelline et les LDL. Cette propriété est bien sûr principalement utilisée dans les industries de cuisson que sont la pâtisserie (Génoises, flans ...) et la charcuterie (surimi, pâtés ...) et la production de certains plats préparés (quenelles). Parmi les trois fractions de base que sont l'œuf entier, le jaune et le blanc, c'est l'utilisation de l'œuf entier qui conduit aux gels les plus fermes. Par comparaison à d'autres ingrédients, d'origine animale ou végétale, le blanc d'œuf reste un gélifiant très performant.

**Pouvoir foisonnant ou moussant** : les propriétés foisonnantes concernent essentiellement le blanc d'œuf. Les agents responsables sont là aussi les protéines, mais toutes n'agissent pas de façon équivalente : certaines participent à une bonne capacité moussante, tandis que d'autres

participent à la stabilité de la mousse à froid (ovomucine) ou après cuisson (ovalbumine). Ces propriétés sont essentiellement recherchées dans les industries de la biscuiterie, de la pâtisserie, de la confiserie et certains plats cuisinés (mousse de légumes, de poissons). Les propriétés foisonnantes du blanc sont extrêmement sensibles à un certain nombre de paramètres physico-chimiques (présence de lipides, modification du pH ou de la force ionique) et aux traitements technologiques, mais il reste dans tous les cas un ingrédient foisonnant très compétitif par rapport aux autres sources protéiques.

**Propriétés émulsifiantes** : les propriétés émulsifiantes concernent quant à elles essentiellement le jaune. Elles font intervenir à la fois des molécules tensio-actives, au premier rang desquelles on trouve la lécithine, qui permettent la formation de nombreuses gouttelettes fines d'huile, et des protéines (LDL) qui donnent au film interfacial une viscosité suffisante pour assurer la stabilité de ce système multiphasique. Ces propriétés sont relativement peu sensibles aux procédés technologiques, mais le jaune d'œuf est alors en concurrence avec un certain nombre d'autres ingrédients tout à fait intéressants au regard de ce critère d'émulsification.

**Pouvoir liant** : la combinaison du pouvoir émulsifiant, du pouvoir coagulant, de la capacité à retenir l'eau et la matière grasse constitue le pouvoir liant qui est recherché en charcuterie pour limiter les pertes à la cuisson.

**Pouvoir anti-cristallisant** : dans les produits de confiserie, l'addition de blanc d'œuf permet de limiter la formation de gros cristaux de saccharose responsables d'une texture désagréable. Qu'il soit sous forme entier, blanc ou jaune, l'œuf demeure donc un ingrédient très utilisé, mais concurrencé par d'autres sources protéiques. Ce constat a progressivement conduit l'industrie des ovoproduits à rechercher une meilleure maîtrise de sa matière première, pour mieux la maîtriser, voire pour améliorer ses performances. Cette réflexion a été menée *via* trois axes principaux qui sont la connaissance des paramètres influents, la connaissance du rôle des différents constituants et la recherche de procédés technologiques permettant d'améliorer les propriétés fonctionnelles des ovoproduits. C'est ainsi que s'est développée la pratique de l'étuvage des poudres de blanc d'œuf qui, selon les barèmes utilisés, peut augmenter très nettement à la fois les propriétés foisonnantes, émulsifiantes et gélifiantes. D'autres pistes ont également été explorées, mais restent à ce jour pour la plupart à un stade pré-industriel : il s'agit par exemple du fractionnement des constituants du blanc et du jaune et de la préparation de complexes protéine-glucide doués de propriétés émulsifiantes particulières.



#### 4. Les propriétés fonctionnelles des protéines laitières et amélioration

Les protéines de lait co-existent dans un mélange complexe, dans des proportions relatives qui varient selon les espèces. Selon leur structure supérieure, on distingue la fraction micellaire (constituée de caséine), et la fraction soluble (constituée de protéines de lactosérum). Le lait de vache contient de l'ordre de  $30 \text{ g.L}^{-1}$  de protéines dont près de 80 % de caséine et près de 20 % de protéines sériques. La caséine bovine comprend quatre composants majeurs (caséine- $\alpha$ S1, caséine- $\alpha$ S2, caséine- $\beta$ , caséine  $\kappa$ ). Les protéines du lactosérum demeurent solubles après déstabilisation de la caséine par acidification au pH 4,6 ou après action de la chymosine. Elles sont représentées notamment par la  $\beta$ -lactoglobuline, l' $\alpha$ -lactalbumine, la sérum albumine bovine, la lactoferrine, et des fractions mineures parmi lesquelles plusieurs classes d'immunoglobulines, les protéose-peptones, la transferrine, ou la  $\beta$ -2-microglobuline.

Parmi les protéines de lait, se trouvent diverses fractions biologiquement actives. Elles correspondent à des immunoglobulines, des enzymes (la lactoperoxydase, le lysozyme, la lipase, la xanthine oxydase, la plasmine, les phosphatases acide et alcaline ...), des hormones (insuline, ...) ou des facteurs de croissance (lactoferrine, IGF1, TGF $\beta$ , EGF, GRP ...) dont la concentration varie au cours de la lactation. C'est le cas de la lactoferrine ( $2 \text{ g.L}^{-1}$  et  $0,1 \text{ g.L}^{-1}$ , dans le colostrum et le lait mature, respectivement), l'insuline ( $65 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$  et  $1 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ ), l'IGF1 ( $310 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$  et  $< 2 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ ), le glucagon ( $0,16 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$  et  $0,01 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ ), la prolactine ( $280 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$  et  $15 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ ), l'hormone de croissance ( $1,4 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$  et  $< 1 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ ). En outre, des études montrent la présence de peptides actifs dans la séquence des protéines de lait ; c'est par exemple le cas du glycomacropéptide de la caséine  $\kappa$ , des casomorphines de caséine, de peptides inhibiteurs de l'enzyme de conversion de l'angiotensine I, de peptides à activité antimicrobienne ou de peptides immunomodulateurs.

Si l'on compare le lait de vache et le lait humain, la concentration en protéines est quatre fois plus élevée dans le lait de vache que dans le lait humain, où la concentration en caséine est environ dix fois plus faible. La caséine humaine comprend principalement de la caséine  $\beta$  et une faible fraction de caséine  $\kappa$ . La concentration en protéines de lactosérum est quantitativement équivalente dans le lait de vache et dans le lait humain mais présente des différences qualitatives importantes. L' $\alpha$ -lactalbumine est la protéine majeure du lactosérum du lait humain. La  $\beta$ -lactoglobuline, composant majeur du lactosérum de lait de vache, est absente du lait humain. La lactoferrine, composant majeur du lait humain, est présente en quantité plus réduite dans le lait de vache. La fraction immunoglobuline est principalement constituée d'IgA sécrétoires dans le lait humain et d'IgG dans le lait de vache.

**Utilisations des protéines laitières :** Des concentrés de protéines de lait sont obtenus à partir du lait écrémé. Par ajustement du pH, addition d'alcalin ou de présure sont produites de la caséine acide, lactique ou présure. Par des technologies à membrane, à partir du lactosérum sont produits des concentrés de protéines de lactosérum (CPL), contenant 30 à 70 % de protéines par rapport à la matière sèche, et des isolats de protéines de lactosérum (IPL), contenant jusqu'à 90 % de protéines dans la matière sèche. A partir d'IPL sont obtenues des protéines purifiées (alpha-lactalbumine, bêta-lactoglobuline).

Les propriétés fonctionnelles des protéines du lait sont reliées à différentes propriétés d'interaction : protéines/eau (mouillabilité, gonflement, solubilité, etc.), protéine/protéine (production de gels, coagulation), protéine/surface (propriétés émulsifiante, moussante). Par exemple, la caséine micellaire présente l'aptitude à former un gel par acidification lactique (gel lactique) ou par coagulation enzymatique (gel présure). La texture d'un produit laitier, tel que le yoghurt, est dépendante des mécanismes moléculaires de gélification.

Une émulsion ou une mousse est stabilisée par des protéines, lorsque celles-ci se retrouvent à la surface de gouttelettes d'huile (émulsion) ou bulles de gaz (mousse). Les propriétés d'adsorption des protéines à la surface des gouttelettes d'huile ou des bulles de gaz favorisant la formation de films protégeant les émulsions et les mousses contre les mécanismes de déstabilisation par coalescence.

Des applications fonctionnelles de la caséine, du caséinate, des protéines sériques et de la poudre de lait sont présentées dans le tableau 09. Les caséinates ont des propriétés émulsifiantes, foisonnantes (aptitude à donner un grand volume de mousse), plastifiantes (obtention de films, d'emballages alimentaires biodégradables), liantes. Les protéines sériques sont solubles sur toute l'échelle de pH. Elles présentent des propriétés de rétention d'eau, des propriétés moussantes, gélifiantes (thermoinduites), etc.

En ce qui concerne les nouveaux développements technologiques, on peut relever celui de la caséine micellaire obtenue par microfiltration (production de phosphocaséinate natif). L'évolution dans le domaine de la caséine pourrait se faire par la production de micelles de caséine dépourvues de calcium (par utilisation d'EDTA) ou enrichies en calcium ou en fer et zinc. Ces modifications entraînent l'apparition de nouvelles structures. L'appauvrissement en phosphate de calcium a un impact sur la digestibilité des micelles. L'enrichissement en phosphate de calcium peut se faire dans un but nutritionnel, mais il diminue la stabilité thermique des micelles. L'appauvrissement en caséine  $\kappa$  a une influence sur les propriétés gélifiantes ou de réticulation des micelles.

**Tableau 09** : Applications fonctionnelles de la caséine, du caséinate, des protéines sériques et de la poudre de lait.

Caséine	Caséinate	Protéines sériques	Poudre de lait
Produits céréaliers	Crèmes glacées et desserts	Crèmes et desserts glacés (meringue)	Produits de boulangerie
Boulangerie	Produits de boulangerie	Confiseries et	
Farine	Lacto-remplaceurs	viennoiseries	Lait condensé
		Produits de boulangerie	Chocolaterie
Lacto-remplaceurs	Charcuterie	(Biscuits...)	
Industries pizza	Soupes	Lacto-remplaceurs	Lacto-remplaceurs
Plats cuisinés	Sauces	Charcuterie	Charcuterie
Fromages fondus	Enrichissement des yaourts ou autres produits laitiers	Soupes	Soupes
	Bases fromagères	Sauces	Sauces
		Enrichissement des yaourts	Enrichissement des yaourts ou autres
	Crèmes fouettés	Ou céréales du petit	produits laitiers
	Petits déjeuners instantanés	déjeuné	

A partir de caséine micellaire et de protéines de lactosérum sont produits des peptides à activité biologique. Des procédés industriels de séparation des protéines individuelles du lactosérum (lactoferrine, bêta-lactoglobuline, alpha-lactalbumine, lactoperoxydase) sont également mis au point. Les protéines mineures du lait de vache pourraient être également valorisées (immunoglobulines, ostéopontine facteurs de croissance, etc.).

### *Interactions entre la bêta-lactoglobuline et le lactose*

La structure quaternaire de la bêta-lactoglobuline, dont la plus probable est la forme dimère, est très sensible aux traitements thermiques. Cette protéine qui possède 16 sites de fixation potentiels pour le lactose, peut en fixer de façon covalente (réaction de Maillard).

L'hétérogénéité de la lactosylation a une incidence sur la digestibilité de la protéine et la nature des peptides obtenus, avec des répercussions probables au niveau de l'absorption des peptides. La dénaturation de la bêta-lactoglobuline peut entraîner la dissociation des dimères en monomères, suivies de formation de polymères ou agrégats. De même, le mécanisme d'interaction entre le lactose et les protéines du lait peut être modifié, notamment en ce qui concerne la bêta-

lactoglobuline à une température comprise entre 37 et 60 °C, ainsi que la caséine ou l'alpha-lactalbumine, mais à des températures plus élevées.

Dans une poudre, la lactosylation ne modifie pas la structure tertiaire de la protéine, ainsi les propriétés interfaciales de la bêta-lactoglobuline ne sont pas modifiées. En revanche, dans une solution, la structure tertiaire est modifiée par la lactosylation et les propriétés interfaciales (interface eau-air) de la bêta-lactoglobuline sont également modifiées.

Les structures différentes obtenues suite à la lactosylation pourraient être susceptibles d'influer sur le caractère allergène, l'affinité vis-à-vis des ligands ou la formation de peptides et d'avoir des conséquences nutritionnelles.

### ***Le traitement UHT***

Ce traitement induit une déstabilisation du lait suite à une précipitation en particulier des protéines. L'augmentation de la stabilité du lait au traitement thermique est obtenue en diminuant la teneur en protéines sériques. Une hypothèse consiste à dire que les protéines sériques se fixeraient à la surface de la micelle lors du chauffage.

Avec le procédé UHT (comprenant un chauffage à 140 °C), on observe notamment une fixation covalente entre protéines et lactose. Le lait UHT n'est pas fromageable : il ne coagule plus. Le traitement UHT est le traitement du lait le plus sévère. On distingue toutefois le procédé UHT direct (injection de vapeur dans le lait) et l'indirect (utilisation d'un échangeur), principalement utilisé en France.

### ***La gélification***

La formation de gel nécessite une teneur en protéines beaucoup plus élevée que la stabilisation de mousse ou d'émulsion. Ainsi, la gélification est la voie de valorisation maximale des protéines. L'état de gel est favorisé par une force ionique élevée ou par un pH proche du point isoélectrique. L'évolution des caractéristiques liquides du gel en fonction du pH est différente quand on compare des micelles seules, des micelles avec d'autres protéines (bêta-lactoglobuline ou ovalbumine, par exemple).

## 5. Les ingrédients protéiques

Pour avoir du succès, un ingrédient alimentaire protéique doit répondre aux critères suivants :

- Posséder de bonnes propriétés fonctionnelles et nutritionnelles ;
- Avoir une concentration protéique élevée ;
- Supporter les étapes de transformation, conditionnement et conservation sans changement majeur ;
- Être compatible avec les autres ingrédients du produit ;
- Être dépourvu de micro-organismes pathogènes et de facteurs toxiques ou antinutritionnels ;
- Être dépourvu de saveurs indésirables et de pigments ;
- Être produit à faible coût et avec une bonne reproductibilité.

Les ingrédients laitiers intégrés dans la composition d'un aliment le sont principalement sous forme de poudre. Il peut s'agir de poudre de lait ou de lactosérum séchés sans traitement préalable. Cependant, la tendance est à l'utilisation d'ingrédients provenant de la concentration et du fractionnement du lait écrémé ou du lactosérum.

### *Poudre de lait entier*

En raison de son coût élevé et du développement de saveurs indésirables par oxydation de la matière grasse au cours de la conservation, la poudre de lait entier est relativement peu utilisée comme ingrédient. L'addition de lécithine permet cependant de maintenir une saveur adéquate à la poudre de lait entier.

A l'exception de l'incorporation de la poudre de lait entier séchée par atomisation en boulangerie pour l'apport de matière grasse ou d'agents émulsifiants, son utilisation comme ingrédient se limite essentiellement à la fabrication du chocolat.

La matière grasse laitière est un des éléments les plus importants entrant dans la composition du chocolat au lait. En raison de sa compatibilité avec le beurre de cacao, elle est capable de former une phase continue. De plus, elle contribue à la saveur douce et à la texture du chocolat et elle est moins coûteuse que le beurre de cacao. D'autre part, la poudre de lait entier améliore la valeur nutritive du chocolat et lui confère sa couleur claire.

### *Poudre de lait écrémé*

Par comparaison avec la poudre de lait entier, la poudre de lait écrémé est peu utilisée pour la fabrication du chocolat, ou alors en association avec l'huile de beurre dans le but de réduire la quantité de beurre de cacao. La poudre de lait écrémé est incorporée à une variété de produits, en raison de sa solubilité, de sa capacité émulsifiante et de rétention d'eau. Le produit est disponible sous 3 formes : low, medium et high-heat. Ce classement d'après le traitement de chaleur appliqué au lait représente indirectement le taux de dénaturation des protéines du lactosérum, qui se traduit par leur insolubilité. La quantité de protéines insolubles du lactosérum doit être inférieure à 25% et supérieure à 81% de la quantité de protéines du lactosérum totale pour les poudres low-heat et high-heat, respectivement. La teneur moyenne en protéines du lactosérum étant de 8-9 mg/g de solides totaux non gras, la quantité de protéines solubles du lactosérum sera supérieure à 6 mg/g, entre 6 et 1,6 mg/g et inférieure à 1,5 mg/g de poudre low-heat, medium-heat et high-heat, respectivement.

Les poudres low-heat contiennent une faible quantité de protéines dénaturées et sont utilisées dans des produits où les propriétés de solubilité, de gélification, d'émulsion et une faible dénaturation des protéines sont importantes (fortification du yoghourt, fromage fait de lait reconstitué, crème et desserts glacés, soupes déshydratées et congelées, sauces déshydratées et sauces à salade). Les poudres medium-heat possèdent une bonne capacité de liaison d'eau et d'activité de surface et sont utilisées dans la crème glacée, les desserts congelés, les soupes congelées, la crème acidifiée etc.

Les poudres high-heat sont hautement dénaturées et peu solubles, la capacité de liaison d'eau est augmentée et le facteur antigonflement du pain réduit. En raison de sa faible solubilité et de la réduction de l'effet dépresseur sur la pâte à pain, ce type de poudre trouve une utilisation dans les produits structurés (boulangerie, biscuiterie, confiserie et salaisonnerie) et contribuent à la cohésion, la texture, la saveur, la couleur et la valeur nutritive du produit.

Les principales sources de variation des poudres de lait écrémé proviennent essentiellement des différences de composition du lait, des prétraitements (concentration, degré de cristallisation du lactose et température de séchage) ainsi que du type de séchage. D'autres traitements sont relativement rares. Il faut signaler les poudres à teneur réduite en calcium, qui améliorent la saveur, la texture, la liaison de l'eau dans la viande et dans les produits tartinables.

### ***Poudre de babeurre***

La composition de la poudre de babeurre est sensiblement équivalente à celle de la poudre de lait écrémé. Incorporée au chocolat, elle contribue à sa saveur caractéristique ainsi qu'à l'émulsion. En boulangerie, elle est incorporée dans les cakes pour sa saveur et le jaunissement du gluten.

### ***Poudre de lactosérum***

Le lactosérum résultant de la fabrication fromagère contient environ 20% des protéines laitières totales. Les progrès dans le domaine du séchage par atomisation ont permis de produire de la poudre de lactosérum non hygroscopique mais avec une proportion plus ou moins grande de protéines non dénaturées, suivant le type de poudre (high-heat, medium-heat ou low-heat).

Les protéines des poudres de lactosérum high-heat sont hautement dénaturées et relativement insolubles et sont utilisées dans des aliments où la solubilité est indésirable ou non nécessaire (produits de boulangerie, pâtes, céréales de petit déjeuner, etc.). Les poudres low-heat contiennent des protéines très solubles et sont utilisées dans les produits alimentaires où la saveur, la couleur, la stabilité physique et la solubilité sont requises.

Les propriétés des poudres de lactosérum dépendent également du type de lactosérum (doux ou acide) et des traitements qu'il a pu subir avant le séchage (démminéralisation, cristallisation du lactose, ultrafiltration, etc.).

Les lactosérums doux présentent un certain intérêt pour les produits de cuisson céréaliers. De plus, les lactosérums doux améliorent la valeur nutritionnelle et organoleptique des produits finis. La poudre de lactosérum déminéralisée est utilisée dans les formules pour nourrissons, dans les aliments diététiques, en confiserie, pâtisserie et peut partiellement remplacer la poudre de lait écrémé dans la crème glacée. L'opération de déminéralisation consiste à retirer, à partir d'un lactosérum doux de très bonne qualité bactériologique contenant très peu d'acide lactique et de minéraux, une partie des ions métalliques et de l'acide lactique.

La poudre de lactosérum délactosée est, quant à elle, un co-produit de la fabrication du lactose. Pour extraire le lactose, le lactosérum est concentré à 65°C, refroidi et centrifugé. Ce produit n'est pas fabriqué pour la préparation d'aliments spécifiques et il est généralement utilisé en alimentation animale.

## *Les caséines et caséinates*

La préparation de caséine résulte d'une succession de traitements, qui sont la précipitation acide ou la coagulation enzymatique de lait écrémé, la séparation du sérum par tamisage ou décantation centrifuge, le lavage à l'eau et la séparation caséine-eau, généralement sur décanteur centrifuge. Après avoir été pressé et broyé, le produit est séché sur lit fluidisé, sur cylindre, par chauffage à attrition, sur sécheur vibratoire ou par atomisation.

La caséine acide est obtenue par acidification du lait écrémé à pH 4,3 et 43- 45°C à l'aide d'acide minéral {chlorhydrique ou sulfurique). Cette précipitation peut être réalisée en continu à partir de 10 000 L à raison de 300 kg/h. La caséine lactique résulte de la précipitation des caséines, suite à l'acidification du milieu par des cultures mixtes acidifiantes, composées généralement de *Streptococcus lactis* et/ou *cremoris*. La caséine présure résulte de la coagulation enzymatique des caséines par la pepsine et la chymosine.

La neutralisation des précipités insolubles de caséines acide et lactique en sels de sodium, potassium, ammonium ou calcium permet d'obtenir un produit soluble plus communément appelé caséinate. Les propriétés des caséinates sont largement influencées par les procédés de fabrication. Les caséinates de Na, K et NH<sub>4</sub> sont complètement solubles en dessous de pH 5,5 et forment des solutions visqueuses qui possèdent d'excellentes propriétés fonctionnelles (émulsifiantes, moussantes, épaississantes, absorption d'eau), supérieures à celles du caséinate de calcium, qui reste sous forme de suspension colloïdale et absorbe beaucoup moins d'eau.

Le caséinate de sodium est incorporé aux produits alimentaires à teneur en eau élevée ou intermédiaire, alors que le caséinate de calcium est incorporé dans les produits à faible teneur en eau. Les caséines sont utilisées en confiserie pour leur capacité de rétention d'eau (plus de 2 fois leur propre poids) et inhibent ainsi la formation de cristaux de sucre. Elles contribuent également au brunissement des bonbons et au développement de saveurs attribuables aux aldéhydes formés par la réaction de Maillard. Les caséinates de sodium, potassium ou calcium sont utilisés couramment dans les produits alimentaires pour leur solubilité, leur absorption d'eau, leur stabilité à la chaleur, leurs propriétés tensioactive (émulsification, moussage) dues à leurs propriétés gélifiantes, coagulantes ainsi que pour leur viscosité.

Les caséinates peuvent être incorporés au lait destiné à la fabrication fromagère, jusqu'à concurrence de 5 grammes de protéines par litre de lait mis en œuvre. Cela a pour effet d'améliorer la texture de certains fromages. En ce qui concerne les produits carnés, l'addition de protéines laitières au moment de la restructuration de la viande de volaille permet de réduire les pertes à la cuisson. Ils sont également utilisés pour leur effet blanchissant, stabilisant, émulsifiant, régulateur de viscosité et leur pouvoir de liaison de l'eau dans les produits suivants : imitations de crème à



café, mélanges à cakes, desserts, garnitures fouettées, crèmes, céréales de petit déjeuner, confiserie, sauces déshydratées et sauces à salade, boissons, imitations de fromage et crèmes alcoolisées. En combinaison avec d'autres protéines alimentaires (protéines de lactosérum, de soja et de céréales), ils sont utilisés en boulangerie, en pâtisserie et dans les desserts glacés.

### *Les cryocaséines*

Il est possible d'isoler sous forme de précipité plus de 95% des caséines du lait écrémé par ultrafiltration de lait écrémé (Jusqu'à un facteur de concentration de 4 à 6), suivie d'une cryodéstabilisation (congélation du rétentat à - 8°C) et d'une centrifugation du rétentat décongelé à 5 000 g pendant 10 min. Ce procédé permet d'obtenir des isolats de caséines possédant à la fois une excellente solubilité et une structure micellaire intacte et pouvant être utilisés comme ingrédients alimentaires, seuls ou en combinaison avec d'autres protéines.

### *Les concentrés de protéines de lactosérum*

Le terme concentré de protéines de lactosérum (CPL) est généralement utilisé pour désigner des produits contenant des teneurs élevées en protéines du lactosérum (de 25 à 95% de leur poids sec) et préparés selon l'une des techniques de concentration ou de fractionnement suivantes : traitement à la chaleur, ultrafiltration, osmose inverse, chromatographie ou précipitation par les agents complexants. Ces traitements peuvent être combinés à une déminéralisation ou à une cristallisation du lactose.

## Chapitre 3 : Les lipides

Les graisses, les huiles ou les lipides sont constitués d'un grand nombre de composés organiques dont des acides gras, des monoacylglycérols, des diacylglycérols, des triacylglycérols (TG), des phospholipides (PL), des eicosanoïdes, des résolvines, des docosanoïdes, des stérols, des esters de stérols, des caroténoïdes, des vitamines A et E, des graisses alcools, hydrocarbures et esters de cire. Classiquement, les lipides étaient définis comme des substances solubles dans les solvants organiques. Il s'agit d'une définition vague et pourrait inclure un certain nombre de composés organiques non lipidiques. Une nouvelle définition et un système complet de classification des lipides ont été proposés en 2005. La nouvelle définition est basée sur la chimie et définit les lipides comme de petites molécules hydrophobes ou amphipathiques (ou amphiphiles) qui peuvent provenir en tout ou en partie de condensations d'unités thioesters et/ou isoprène. Les lipides des tissus biologiques sont divisés en huit catégories, comme le montre le tableau 10 et chaque catégorie comporte des classes et des sous-classes de molécules distinctes.

**Tableau 10** : Catégories de lipides et exemples typiques.

Catégorie	Exemple
Acyles gras	Acide oléique
Glycerolipides	Triacylglycerol
Glycerophospholipides	Phosphatidylcholine
Sphingolipides	Sphingosine
Stérols	Cholestérol
Prénols	Farnésol
Saccharolipides	UDP-3-0-(3-hydroxytetradecanoyl)- N-acetylglucosamine
Polycetides	Aflatoxine

### 1. Propriétés chimiques et physiques des lipides

#### *Propriétés physiques*

##### ➤ Solubilité

L'acide butyrique à 4C est soluble dans l'eau, puis la solubilité des acides gras baisse progressivement et ils sont insolubles à partir de 10°C. Ils sont solubles dans les solvants organiques apolaires : benzène, chloroforme, ...

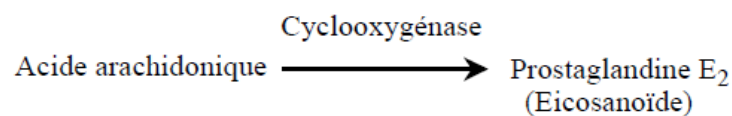
➤ **Le point de fusion**

Le point de fusion augmente avec le nombre de carbone et il diminue quand le nombre de doubles liaisons augmente. Ainsi, ils sont liquides à 20° C si le nombre de carbone est inférieur à 10 C et solides si le nombre de carbone est égale à 10.

*Propriétés chimiques*

➤ **Oxydation des doubles liaisons**

L'oxydation par l'oxygène de l'air conduit au rancissement des graisses. L'oxydation enzymatique intracellulaire de l'acide arachidonique par la cyclooxygénase (cyclisation + oxydation) conduit aux prostaglandines qui sont des médiateurs très actifs, très rapidement dégradés.

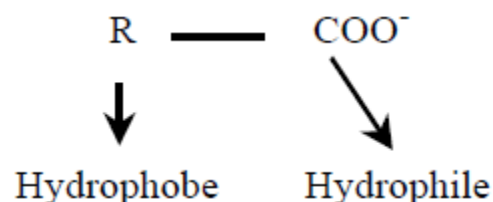


Les prostaglandines interviennent : (1) dans la contraction des muscles lisses (intestin, utérus, vaisseaux) ; (2) dans la régulation des métabolismes ; (3) dans l'agrégation plaquettaire. L'inhibition de la cyclooxygénase des plaquettes par l'aspirine est utile en thérapeutique (antiagrégant plaquettaire).

➤ **Formation de sels de sodium ou potassium**

Ce sont des savons à propriétés moussantes, mouillantes et émulsionnantes. Dans l'eau les savons se dissocient en  $\text{Na}^+ + \text{R-COO}^-$ .

L'anion a 2 pôles :



Ces molécules appelées amphiphiles ou amphipathiques, sont tensioactives : elles abaissent la tension superficielle de l'eau d'où leurs propriétés.

- **Formation d'ester (avec Glycérol et Cholestérol) et de thioester (avec le Coenzyme A).**

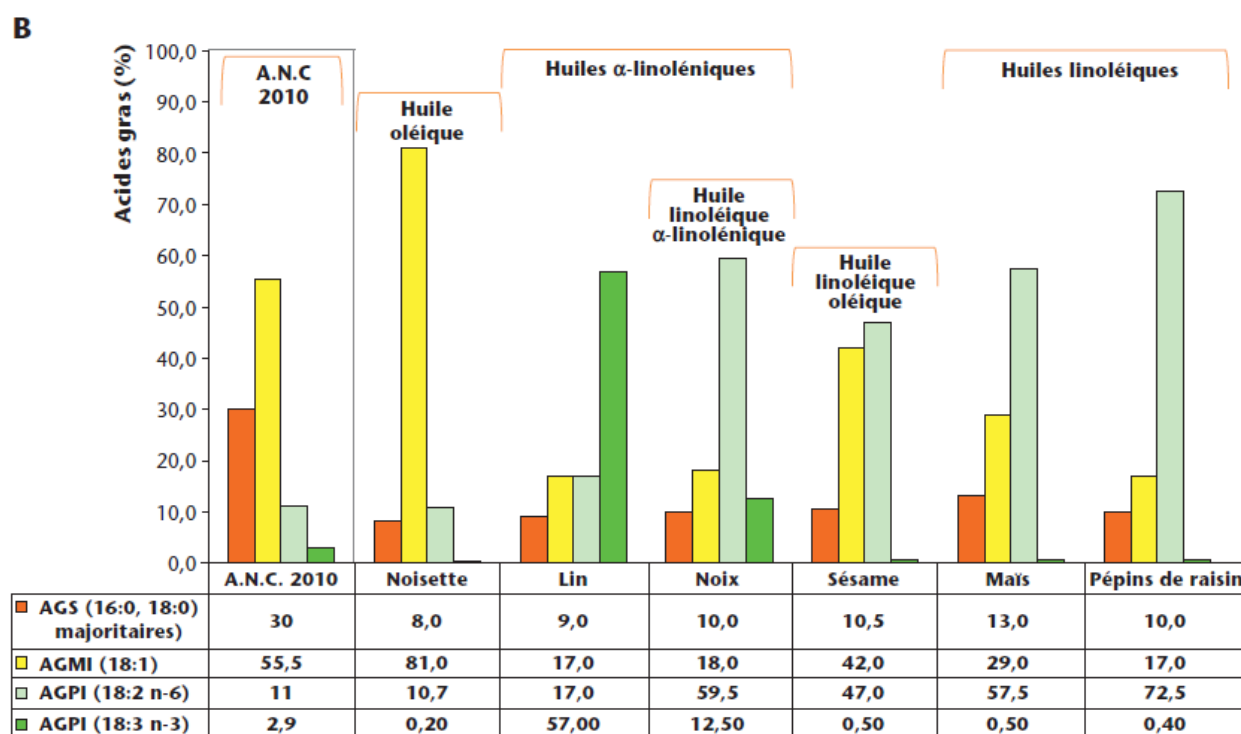
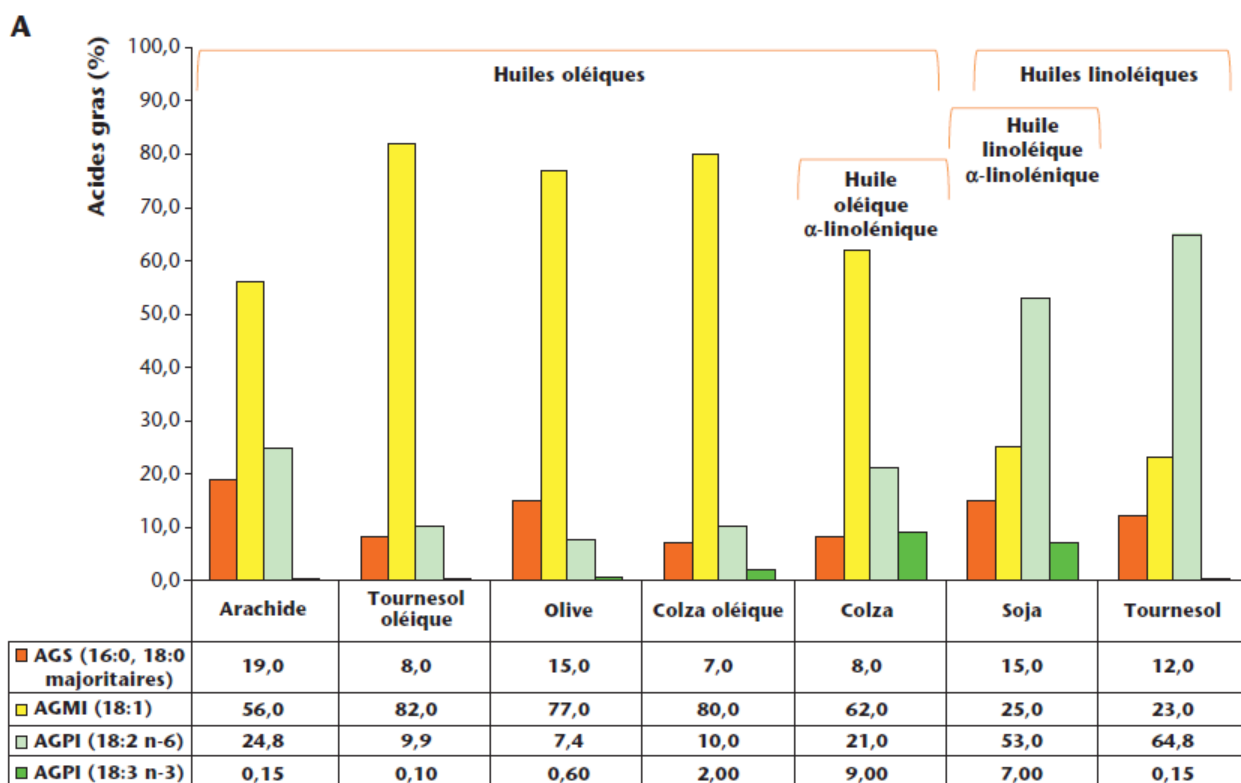
## 2. Propriétés fonctionnelles de certains corps gras

Les principales propriétés des acides gras sont liées à leur insaturation : plus elle est élevée, plus le point de fusion diminue (augmentation de la fluidité), plus leur intérêt physiologique s'accroît tout comme leur réactivité chimique ce qui joue négativement sur la stabilité, notamment par une plus grande susceptibilité à l'oxydation. La géométrie des insaturations influence également le comportement à la fusion : à longueur de chaîne équivalente, un isomère trans d'acide gras aura ainsi un point de fusion (PF) intermédiaire entre ceux de son isomère cis et de l'acide gras saturé correspondant (acide stéarique, C18:0, PF=70 °C ; acide oléique, C18:1 cis, PF = 13 °C ; acide élaïdique, C18:1 trans, PF = 45 °C).

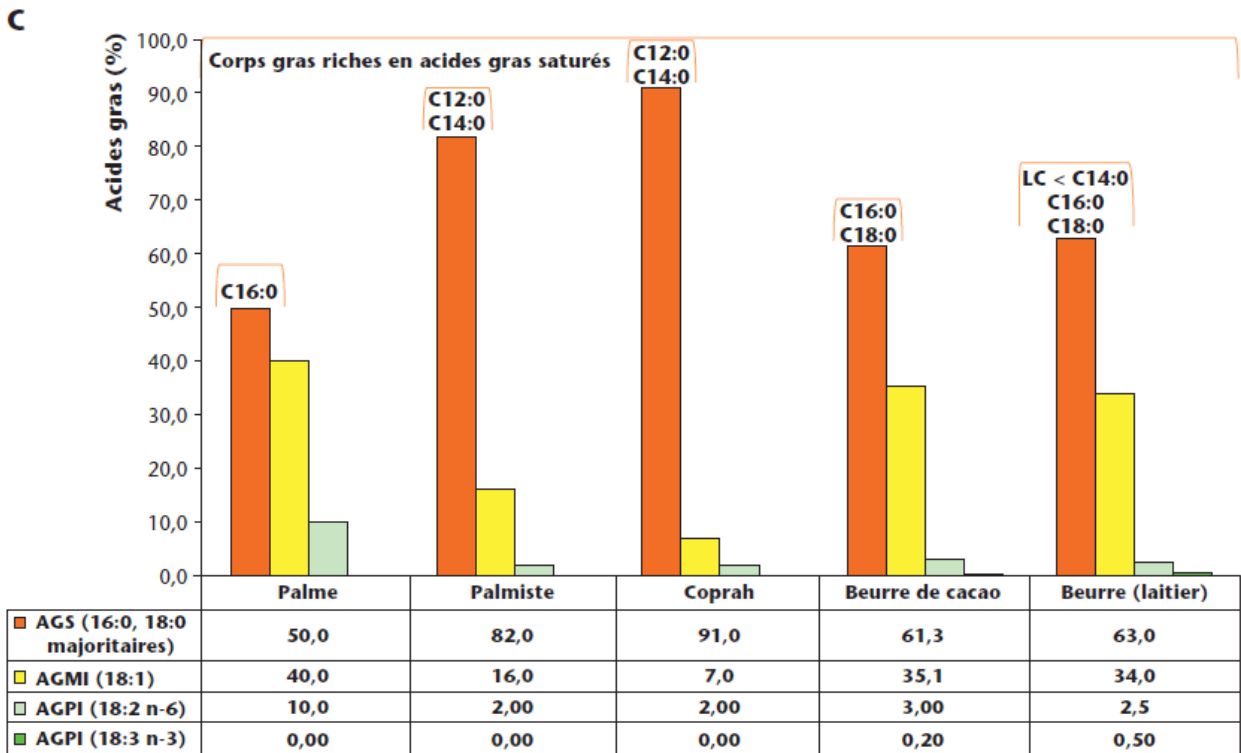
La structure des triglycérides qui correspond à la nature et à la position des acides gras sur le glycérol constitue de fait la composition réelle du corps gras conditionne ses propriétés physiques (fusion, solidification) et rhéologiques, chimiques et nutritionnelles. La fusion, la solidification par cristallisation en des formes cristallines variées et variables (polymorphisme) selon les conditions influencent directement les propriétés rhéologiques. Le polymorphisme résulte de l'organisation spatiale des chaînes hydrocarbonées (arrangement latéral) et de l'empilement en strates des molécules de triglycérides (arrangement longitudinal).

Ainsi, la dureté (ou la consistance) d'un corps gras dépend i) de sa composition en acides gras ; du plus dur au plus fluide : AGS > [AGT] > AGMI > AGPI ; ii) de sa structure triglycéridique qui influence l'importance du polymorphisme à l'état solide ; iii) des conditions de sa mise en œuvre : température et passé thermique (vitesse de refroidissement, donc de cristallisation), travail mécanique (agitation, pression ou cisaillement pendant la cristallisation).

Les corps gras riches en acides gras insaturés fondent à des températures inférieures à 15 °C (huiles fluides à température ambiante, figure 9A et B) ; ceux plus riches en AGS fondent à partir de 30 °C (graisses solides à température ambiante – figure 8C).



**Figure 9. A, B, C) :** Classement de quelques huiles végétales par catégorie d'acides gras (saturés, monoinsaturés, polyinsaturés linoléique et  $\alpha$ -linoléique) – Familles et sous-familles.



**Figure 9 (Suite)**

Dans la mesure où la matière grasse incorporée à de nombreux produits alimentaires formulés se trouve dans un état cristallisé ou semi-cristallisé aux températures de stockage et d'utilisation, elle conditionne les propriétés rhéologiques et la texture des produits finis et différemment selon qu'elle se trouve en phase continue ou dispersée : émulsions eau dans l'huile telles que le beurre et les margarines ou huile dans eau du type sauce mayonnaise, crèmes glacées ou chantilly. La stabilité oxydative est également dépendante de la composition en acides gras et secondairement de la structure triglycéridique. La sensibilité vis-à-vis de l'oxydation est directement reliée au nombre d'insaturations.

### 3. Les besoins nutritionnels en corps gras

Les apports nutritionnels conseillés (ANC) en lipides pour la population générale sont fixés entre 30 et 35 % de l'apport énergétique totale quotidien (AETQ). De la synthèse des publications relatives à l'homme, il ressort qu'un apport d'acide linoléique de 3 à 4% de l'apport énergétique doit prévenir toute manifestation de carence. Inversement, un excès est à éviter du fait de la compétition avec l'acide  $\alpha$ -linoléique pour la synthèse des acides gras polyinsaturés à longues chaînes (AGPI-LC) et de ses conséquences sur les risques de cancer et de maladies cardiovasculaires. Le rapport entre ces deux acides gras essentiels doit de même être limité à cinq : l'acide linoléique, 10 g/j (4 % de l'AETQ), et l'acide  $\alpha$ -linoléique, 2 g/j (0,8 % de l'AETQ),

étant dans un rapport de cinq à un. Le DHA (acide docosahéxaénoïque) devrait être apporté dans la proportion qu'on observe dans un régime satisfaisant, à savoir 120 mg/j.

Parmi les acides gras monoinsaturés (AGMI) (tableau 11), l'acide oléique occupe une place à part et réduit la cholestérolémie lorsqu'il est substitué à des AG saturés (AGS). Quant aux AGS (tableau 11), constituants naturels des phospholipides, sphingolipides et triglycérides de réserve, ils sont en partie convertis en AGMI par des désaturases et sont indispensables à la constitution de certaines membranes nerveuses, notamment la myéline. Si ce n'était l'excès de consommation moyenne qui les caractérise et qui a été mis en rapport avec la mortalité coronarienne, il faut différencier les effets des AGS, de nature hypercholestérolémiant pour certains, tels que les acides laurique, et surtout myristique et palmitique, d'un rôle clé dans l'acylation de certaines protéines.

Les AG à chaîne courte (AGCC), de quatre à dix atomes de carbone (tableau 11), n'ont pour leur part pas d'effet négatif : l'acide butyrique qui provient de la dégradation des fibres alimentaires par les bactéries coliques, a des vertus antiprolifératives et induit l'apoptose des cellules tumorales du côlon. En résumé, il est conseillé que les AGS ne dépassent pas le quart des apports en lipides, soit 8 % de la ration énergétique totale.

Concernant le cholestérol alimentaire, et avant de diaboliser de façon inconsidérée l'hypercholestérolémie et de chercher à tout prix à la diminuer, il est bon de rappeler que sa relation avec le risque cardiovasculaire diminue avec l'âge et disparaît chez la personne âgée. Si la limitation de l'apport exogène de cholestérol se justifie chez les patients à risque, les recommandations générales contenues dans les ANC 2001 au sujet des lipides et de la répartition des AG placent les sujets dans des conditions de maîtrise nutritionnelle quasi optimales. Une réduction de l'apport exogène de cholestérol en deçà de 200-300 mg/j ne paraît pas de nature à influencer significativement le risque.

Concernant le nouveau-né et le tout jeune enfant (tableau 12), il est très important que leur apport de lipides soit suffisant et qualitativement adéquat, du fait du développement très rapide à cet âge des structures cellulaires, particulièrement cérébrales. Dans l'alimentation pour nourrisson, la quantité d'acide linoléique doit représenter entre 9 (minimum) et 22 % (maximum) des AG totaux et l'acide  $\alpha$ -linoléique entre 1 et 3 % : le rapport entre les deux AGPI doit se situer entre cinq et dix. En prenant le lait maternel comme référence, on peut fixer la proportion de DHA et d'EPA à 0,3-0,4 % et 0,4-0,5 % respectivement des AG totaux et le rapport à 1,3.

Le besoin en acide linoléique a été fixé à 11 g/j (ou 4,4 % de l'énergie totale de la ration), chez la femme enceinte et allaitante, celui en acide  $\alpha$ -linoléique à 2 g/j et 2,2 g/j respectivement,

et leur rapport à une valeur moyenne de cinq, pour un apport lipidique conseillé représentant 30 % de la ration calorique totale. Il est en outre recommandé de favoriser dans ces mêmes situations un apport de DHA suffisant pour assurer une valeur satisfaisante au nouveau-né, à savoir 200 à 300 mg/j (ou 0,4 % des AG totaux), ce qui ne paraît pas être le cas actuellement. Dans le lait humain, qui reste le modèle de référence, la moitié de l'énergie est représentée par les lipides, dont un tiers sous forme d'AGMI. Le développement et la maturation périnatale du système neurosensoriel (cerveau, moelle épinière, nerfs périphériques) exigent un apport important d'AGPI-LC n-3, dont l'excès doit être évité à cause des risques de peroxydation. À partir de 3 ans, les lipides totaux doivent être limités à 35 %, les AGS à 8-12 % de l'énergie totale et le cholestérol à 300 mg/j ; les triglycérides à chaîne moyenne ne sont pas nécessaires chez l'enfant en bonne santé.

Les personnes âgées, compte tenu de la diminution de leur capacité enzymatique, doivent avoir un apport d'acide linoléique d'au moins 6 g/j (ANC de 7,5 g/j), ce qui correspond à la consommation observée, mais avec un meilleur équilibre par rapport à l'acide  $\alpha$ -linoléique, dont l'apport va de 0,3 à 0,7 g/j, alors que l'ANC est désormais de 1,5 g/j.



**Tableau 11** : Familles d'acides gras essentiels (AGE) et principaux acides gras non essentiels.

AGE (essentiels)					
AGPI			AGPI-LC		
n-6	18 :2*	18 :3	20 :4	22 :4	22 :5
ANC (homme)	acide linoléique 10 g/j = 4 % AETQ**		acide arachidique		
n-3	18 :3	18 :4	20 :4	20 :5	22 :5
ANC (homme)	acide $\alpha$ -linoléique 2 g/j = 0,8 % AETQ			acide éicosapentaénoïque ou EPA 0,5 g/j = 0,20 % AETQ	22 :6 acide docosahéxaénoïque DHA 0,12 g/j = 0,05 % AETQ
AG non essentiels					
AGMI					
n-9	18 :1				
AGS	acide oléique				
AGS	12 :0	14 :0	16 :0	18 :0	
	acide laurique	acide myristique	acide palmitique	acide stéarique	
AGCC	acide butyrique 4 :0				

\* Le chiffre de gauche indique le nombre de carbones, le chiffre de droite le nombre de doubles liaisons, marquant l'insaturation relative.

\*\* AETQ : apport énergétique total quotidien.

AGPI : acides gras polyinsaturés ; LC : longue chaîne ; AGMI : acides gras mono-insaturés ; AGCC : acides gras à courte chaîne.

**Tableau 12 :** Apports nutritionnels conseillés en acides gras (AG) polyinsaturés chez l'enfant non pathologique.

	AG en % de l'apport énergétique total	
Nourrisson né prématuré de la naissance à 4 mois d'âge corrigé	AL <sup>(1)</sup> : 2,7 à 5 %	AA <sup>(2)</sup> : 0,1 à 0,25 %
	AAL <sup>(3)</sup> : 0,4 à 1 %	EPA <sup>(4)</sup> : 0,05 à 0,15 %
	AL/AAL = 4 à 10	DHA <sup>(5)</sup> : 0,1 à 0,4 %
Nourrisson né à terme de la naissance à 4 à 6 mois	AL : 2 à 4,5 %	11 : 0,1 à 0,25 %
	AAL : 0,45 à 1,5 %	EPA : 0,05 à 0,15 %
	AL/AAL = 4 à 10	DHA : 0,1 à 0,4 %
Enfants du sevrage à l'âge de 1 à 2 ans	AL : 2 à 5 %	
	AAL : 0,4 à 1 %	
Enfants de l'âge de 3 ans à la fin de l'adolescence	AL : 2 à 5 %	
	AAL : 0,4 à 1 %	

1 : acide linoléique (C18 : 2 n-6). 2 : acide arachidonique (20 : 4 n-6). 3 : acide  $\alpha$ -linoléique (20 : 4 n-6).

4 : acide éicosapentaénoïque (20 : 5 n-3). 5 : acide docosahéxanoïque (22 : 6 n-3).

#### 4. Conservation et altération

La stabilité du muscle vis-à-vis de l'oxydation dépend de la localisation, de la composition, de la concentration et de la réactivité de trois facteurs : les substrats et les catalyseurs de l'oxydation et les antioxydants. Au niveau des tissus vivants, il existe des mécanismes naturels de contrôle de l'oxydation afin de prévenir la destruction oxydative des lipides membranaires, des protéines et des acides nucléiques. Ainsi, il existe une régulation des systèmes pro-oxydants et anti-oxydants qui permet de maintenir la balance entre les facteurs impliqués dans les réactions d'oxydation. La régulation des facteurs pro et antioxydants est perturbée à la mort de l'animal et durant le stockage et la transformation des muscles. Ce dérèglement induit des changements des propriétés biochimiques du muscle. Ces modifications sont caractérisées notamment par une augmentation de la teneur en fer libre, une activation des protéines héminiques, la dégradation des membranes. Ces différents facteurs favorisent le développement des réactions d'oxydation qui induisent la dégradation des propriétés biochimiques, organoleptiques et nutritionnelles de l'aliment.

Les facteurs qui influencent l'oxydation des lipides sont nombreux. Il s'agit de facteurs intrinsèques tels que la composition en acides gras des lipides (nombre et position des insaturations), la présence de pro oxydants (hème, ions métalliques, enzymes) ou d'antioxydants

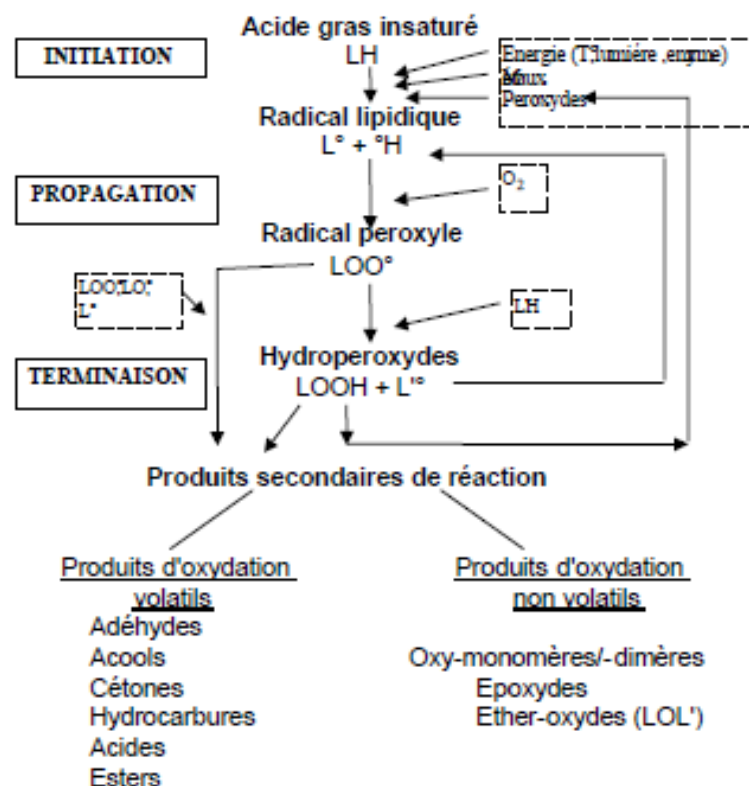
naturels (tocophérols, caroténoïdes...) et des facteurs externes tels que la température, la lumière, la pression partielle en oxygène, l'activité de l'eau, les conditions de stockage et de transformation.

L'oxydation des lipides peut résulter de plusieurs voies réactionnelles en fonction du milieu et des agents initiateurs :

- l'auto-oxydation catalysée par la température, les ions métalliques, les radicaux libres ;
- la photo-oxydation, initiée par la lumière en présence de photosensibilisateurs
- l'oxydation enzymatique initiée par la lipoxygénase.

### ➤ Auto-oxydation

L'oxydation des lipides est une réaction auto-catalytique. Il s'agit d'un enchaînement de réactions radicalaires se déroulant en trois étapes (Figure 10). Une première réaction produit un radical libre par élimination d'un hydrogène de l'acide gras (initiation). Puis les réactions s'enchaînent pour produire plusieurs radicaux libres (propagation) qui se combinent pour former des composés non radicalaires (terminaison).

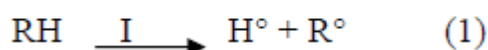


$L^\circ$ : radical libre. ;  $LO^\circ$ : alkoxydes ;  $LOO^\circ$ : radical ;  $LOOH^\circ$ : hydroperoxide;  $LH^\circ$ : lipide insaturé ;  $H^\circ$ : proton.

**Figure 10** : Schéma général de l'auto-oxydation des lipides.

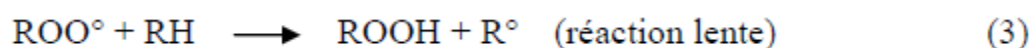
### Mécanisme réactionnel de l'oxydation des lipides

INITIATION : En présence d'un initiateur (I), les lipides insaturés (RH) perdent un atome d'hydrogène pour former un radical libre de lipide ( $R^\circ$ ) (radical, lipoyle).

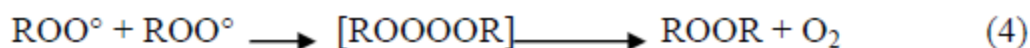


Ce mode d'initiation, favorisé par une élévation de température, peut être produit par des radiations ionisantes, des générateurs chimiques, des systèmes enzymatiques ou chimiques produisant des espèces activées de l'oxygène, ou de traces métalliques.

PROPAGATION : Les radicaux libres formés fixent l'oxygène moléculaire et forment des radicaux libres peroxydes instables (2) qui peuvent réagir avec une nouvelle molécule d'acide gras pour former des hydroperoxydes (3).

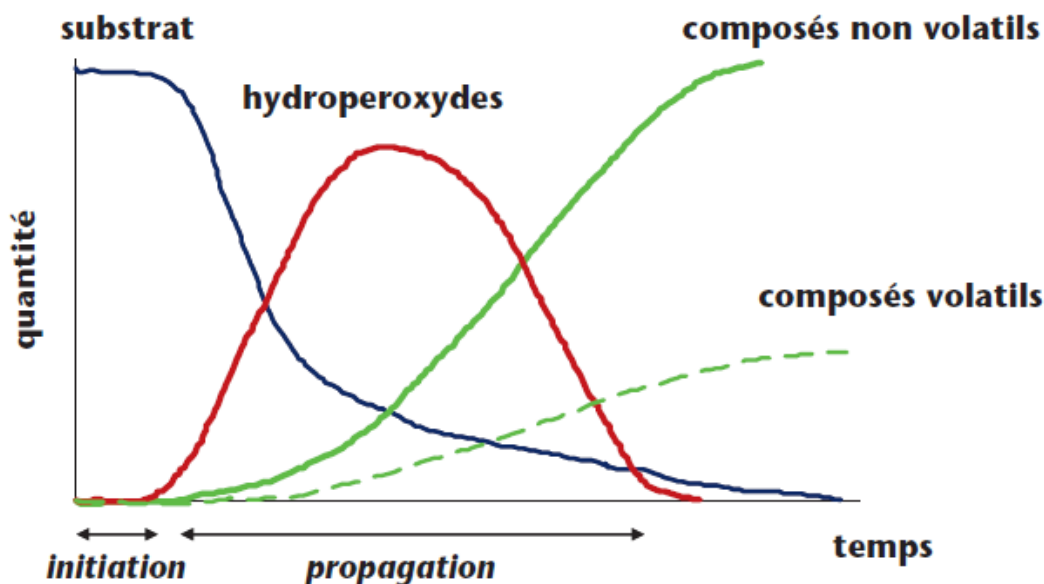


TERMINAISON : Les radicaux formés réagissent entre eux pour conduire à un produit qui n'est pas un radical libre.



Les hydroperoxydes peuvent également se décomposer par scission homolytique de la liaison O-O pour former un radical alcoyl et un radical hydroxyl. Le radical alcoyl réagit avec d'autres substrats et propage la réaction en chaîne. Il peut également subir une scission carbone-carbone de part et d'autre du radical pour former un radical alkyl et un radical vinyl. Le radical alkyl peut réagir avec un hydrogène, un radical hydroxyl ou une molécule d'oxygène générant ainsi des hydrocarbures, des alcools et d'autres hydroperoxydes. Le radical vinyl peut réagir avec un radical hydroxyl, un radical hydrogène ou l'oxygène moléculaire pour générer des aldéhydes et des hydrocarbures.

Il faut également avoir conscience que l'oxydation est un phénomène évolutif, comme le schématise la figure 11, et qu'une mesure seule, à un temps donné, ne permet pas toujours de rendre compte de l'état réel d'oxydation, ni de savoir à quel stade d'avancement des réactions on se situe. Il est donc intéressant d'établir les cinétiques d'évolution des marqueurs d'oxydation, ce qui permet de repérer le temps d'induction, c'est-à-dire le moment où commence à apparaître le phénomène d'oxydation.

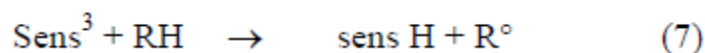


**Figure 11** : Evolution schématique de l'auto-oxydation des acides gras insaturés au cours du temps.

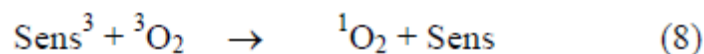
### ➤ Photo-oxydation

La photo-oxydation est une voie importante de production d'hydroperoxydes en présence d'oxygène, d'énergie lumineuse et de photosensibilisateurs tels que les hémoprotéines ou la riboflavine. Les photosensibilisateurs (Sens) absorbent l'énergie lumineuse et passent à l'état triplet excité (Sens<sup>3</sup>). Les photosensibilisateurs interviennent dans l'oxydation des lipides selon deux types de mécanismes.

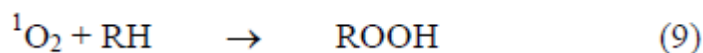
Les photosensibilisateurs de type I, telle que la riboflavine, agissent comme les radicaux libres initiateurs. Dans leur état triplet, elles arrachent un atome d'hydrogène ou un électron aux molécules lipidiques pour former un radical capable de réagir avec l'oxygène (7).



Selon le second mécanisme, les molécules photosensibles de type II, telles que la chlorophylle et l'érythrosine, réagissent dans leur état excité (Sens<sup>3</sup>) avec l'oxygène triplet (8) auquel elles transfèrent leur énergie pour donner de l'oxygène singulet (<sup>1</sup>O<sub>2</sub>).



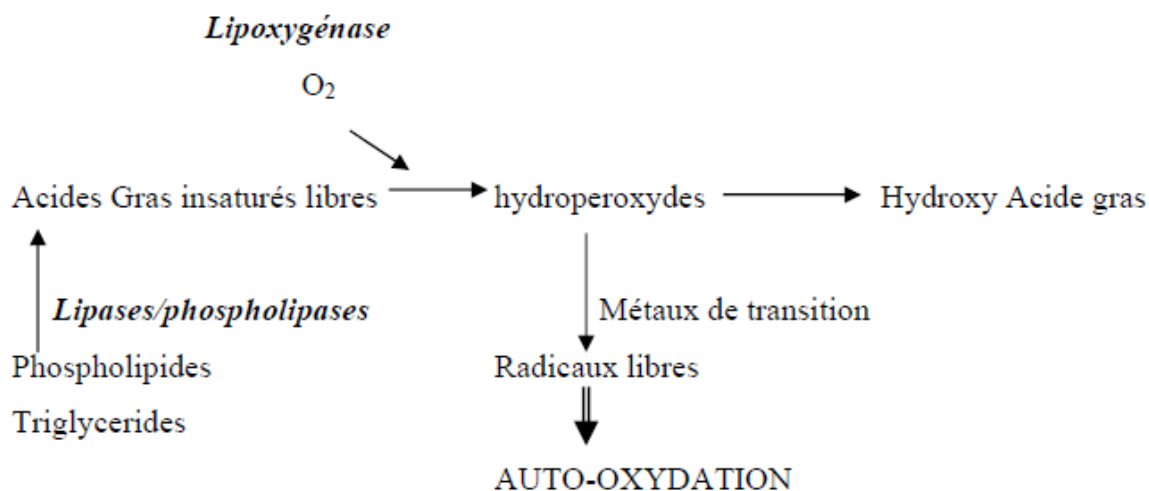
L'oxygène singulet ainsi formée est très électrophile et peut réagir directement sur un acide gras insaturé (RH) formant ainsi un hydroperoxyde ROOH (9).



Par la suite interviennent les réactions radicalaires en chaîne de l'auto oxydation. Les hydroperoxydes ainsi formés sont différents de ceux formés par auto-oxydation.

### ➤ Voie enzymatique

Le phénomène d'oxydation des acides gras insaturés peut être d'origine enzymatique. Les deux enzymes principalement impliquées sont la lipoxygénase et la cyclooxygénase. La lipoxygénase catalyse l'insertion d'une molécule d'oxygène sur un acide gras insaturé selon une réaction stéréospécifique et aboutit à la formation d'hydroperoxydes. Elle agit spécifiquement sur les acides gras non estérifiés. Son activité est donc souvent couplée avec celle des lipases et phospholipases (Figure 11). La cyclooxygénase est une lipoxygénase qui incorpore deux molécules d'oxygène au niveau d'un acide gras pour former des hydroperoxydes spécifiques. Les cyclooxygénases catalysent la formation *in vivo* des prostaglandines et thromboxanes et les lipoxygénases celle des leucotriènes. Les substrats de la lipoxygénase de poisson sont les AGPI comme l'acide arachidonique (C20 :4 $\omega$ 6), l'EPA (C20 :5 $\omega$ 3) et le DHA (C22 :6 $\omega$ 3).



**Figure 11** : Mécanisme d'initiation de la peroxydation des lipides par l'activité lipoxygénasique.

L'oxydation enzymatique se produit même à basse température. Durant le stockage à l'état congelé l'activité enzymatique est très faible. Cependant, une fois la décongélation amorcée et des températures de 0°C à 4°C atteintes, il semblerait que cette activité reprenne et s'accroisse. Cette activité lipoxygénasique est surtout présente au niveau des branchies et de la peau du poisson. Chez le poisson, les lipoxygénases présentes seraient les 12-lipoxygénase, 15-lipoxygénase et 9-lipoxygénase dont l'activité conduit à la formation des 12-hydroperoxydes, 15-hydroperoxydes et 9-hydroperoxyde. Les activités des 12-lipoxygénase, 15-lipoxygénase, et 9-lipoxygénase ont été mises en évidence au sein de la peau de hareng (*Clupea haerengus*) et de sardine (*Sardina pilchardus*), avec

une activité prédominante de la 12-lipoxygénase. L'activité de la 12-lipoxygénase est également présente dans les muscles de maquereaux.

La décomposition de l'acide arachidonique-12-hydroperoxyde issu de l'activité lipoxygénasique des ouïes de truite conduit à la formation de 2-nonénale, 1-octène, 1-octène-3-ol, 2-octène, 2-octène-1-ol. La décomposition de l'acide eicosapentaénoïc-12-hydroperoxyde conduit à la formation du 2,6-nonadiénale, 1,5-octadiène-2-ol et 2,5-octadiène-1-ol.

Au cours de la période post mortem et de la transformation des poissons, des lipoxygénases seraient libérées par la peau et généreraient des hydroperoxydes de lipides au sein des muscles. Ces hydroperoxydes participeraient à l'initiation et à la propagation de l'oxydation. Cette voie enzymatique de peroxydation nécessite la présence de cofacteurs et un pH situé entre 6 et 7 dans le cas des muscles de poisson. Les lipoxygénases du poisson sont inactivées à des températures supérieures à 60°C, pour lesquelles l'oxydation non enzymatique est favorisée. Ces enzymes peuvent être inhibées par les tocophérols (vitamine E) qui sont des antioxydants naturels.

L'état d'oxydation dans lequel se trouve une huile peut être mesuré de diverses manières, selon que l'on dose l'apparition des produits primaires d'oxydation (diènes conjugués, hydroperoxydes) ou des produits secondaires (polymères, composés volatils. . .), la consommation d'oxygène ou des acides gras insaturés, ou encore la co-oxydation d'autres substrats, tels que des pigments ou des protéines. Le tableau 13 présente les diverses méthodes et normes françaises ou internationales actuellement disponibles.

Il est possible d'intervenir pour retarder ou ralentir le processus de dégradation de l'huile pendant le stockage. Une première voie consiste à supprimer tous les facteurs favorables à l'initiation ou à la propagation, c'est-à-dire l'oxygène, l'élévation de température, l'action de la lumière ou la concentration en catalyseurs (métaux, pigments, enzymes). Ces précautions sont mises en œuvre pendant la fabrication des huiles puis au cours du stockage, notamment par un choix d'emballages appropriés et/ou par inertage à l'azote des huiles avant conditionnement afin de réduire le réservoir d'oxygène disponible dans l'espace gazeux qui risque de diffuser dans l'huile au cours de sa conservation.

**Tableau 13** : Méthodes d'évaluation de l'état d'oxydation des huiles.

Marqueurs d'oxydation	Méthodes
Niveau d'insaturation	Indice d'iode (mesure colorimétrique) (Norme AFNOR NF EN ISO 3961)
Profil en acides gras	Dosage par chromatographie en phase gazeuse après méthanolyse des triglycérides (Norme AFNOR NF EN ISO 12966-2 et 5508)
Teneur en acides gras libres	Indice d'acide par colorimétrie (Norme AFNOR NF EN ISO 660)
Teneur en diènes conjugués	Mesure par spectrophotométrie UV (Norme AFNOR NF EN ISO 3656)
Taux de peroxydes	Indice mesuré par iodométrie (Norme AFNOR NF EN ISO 3960) ou potentiométrie (ISO 27107)
Présence d'aldéhydes	Indice de para-Anisidine par spectrophotométrie (Norme AFNOR NF EN ISO 6885) Test TBA (acide 2-thiobarbiturique) par spectrophotométrie
Taux de polymères	Mesure directe par chromatographie liquide haute performance d'exclusion (AFNOR NF EN ISO 16931) ou par viscosité
Taux de composés polaires	Chromatographie liquide d'absorption et gravimétrie (Norme AFNOR NF EN ISO 8420)
Composés volatils	Mesure par chromatographie en phase gazeuse de l'espace gazeux (AOCS Recommended Practice Cg 1-83, 4-94)
Rancidité	Analyse sensorielle avec juges experts (AOCS Recommended Practice Cg 2-83)

Dans certains cas, en particulier dans les produits formulés ou quand la teneur en antioxydants endogènes n'est pas suffisante, même si l'on s'efforce de limiter la détérioration oxydative de l'huile, les moyens de prévention s'avèrent parfois insuffisants ou difficiles à mettre en œuvre. On a alors recours à une deuxième voie qui consiste à ajouter un agent antioxydant qui va ralentir l'activité des catalyseurs de l'oxydation ou limiter la propagation des radicaux libres. Ces additifs viennent compléter ou renforcer le rôle déjà tenu par les composés antioxydants naturellement présents dans les huiles ou dans certains ingrédients des produits formulés.

Les antioxydants peuvent être classés en deux groupes selon leur mode d'action. Les antioxydants primaires, également appelés antiradicalaires, sont des molécules capables de bloquer les radicaux lipidiques L°, LO° et LOO° par transfert d'un H°. L'antioxydant devient alors lui-même



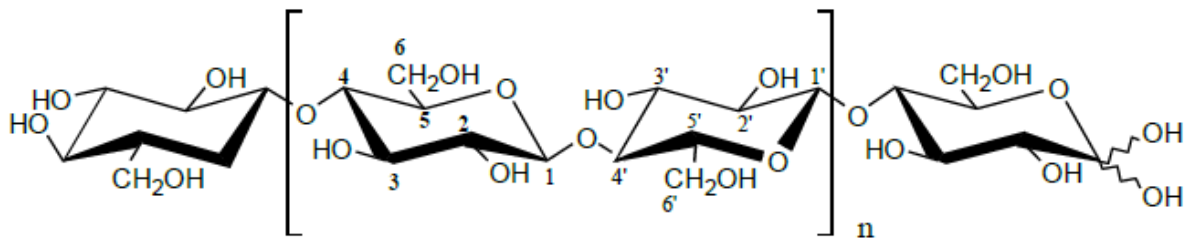
porteur d'un radical, mais à la différence des radicaux lipidiques, il est peu réactif, ce qui stoppe la propagation radicalaire. Ce groupe d'antiradicalaires est constitué presque exclusivement de composés phénoliques en raison de la grande stabilité apportée par leur cycle aromatique. On trouvera ainsi dans ce groupe les additifs antioxydants, BHA, BHT, TBHQ, gallates, mais aussi les tocophérols (vitamine E) et les polyphénols végétaux (flavonoïdes, acides phénoliques, diterpénoïdes).

Les antioxydants secondaires agissent par des mécanismes indirects tels que la chélation des ions métalliques ou la réduction d'oxygène. On les appelle aussi antioxydants préventifs car ils viennent compléter les moyens de prévention de l'oxydation, ou encore synergistes car ils sont souvent employés en combinaison avec les antiradicalaires dont ils renforcent l'action. Les agents chélateurs de métaux les plus couramment utilisés sont l'EDTA et l'acide citrique. Certains polyphénols végétaux possèdent également cette capacité grâce à leurs groupements orthodiphénoliques. C'est le cas par exemple de la quercétine, des catéchines et de l'acide carnosique. Parmi les réducteurs d'oxygène, citons principalement les acides ascorbique (vitamine C) et érythorbique. On peut également mentionner le bêta-carotène et le lycopène qui sont des désactivateurs de l'oxygène singulet, forme active de l'oxygène en photooxydation.

## Chapitre 4 : Etude des polysaccharides

### 1. La cellulose et ses dérivés

La cellulose est considérée comme le polymère renouvelable le plus abondant sur terre. Ce matériau structuré est organisé en microfibrilles liées les unes avec les autres pour former des fibres de cellulose. La cellulose est un homo-polysaccharide linéaire composé d'unités  $\beta$ -D-glucopyranose liées par des liaisons  $\beta$ -1-4. La structure chimique de la cellulose est présentée sur la figure 12.



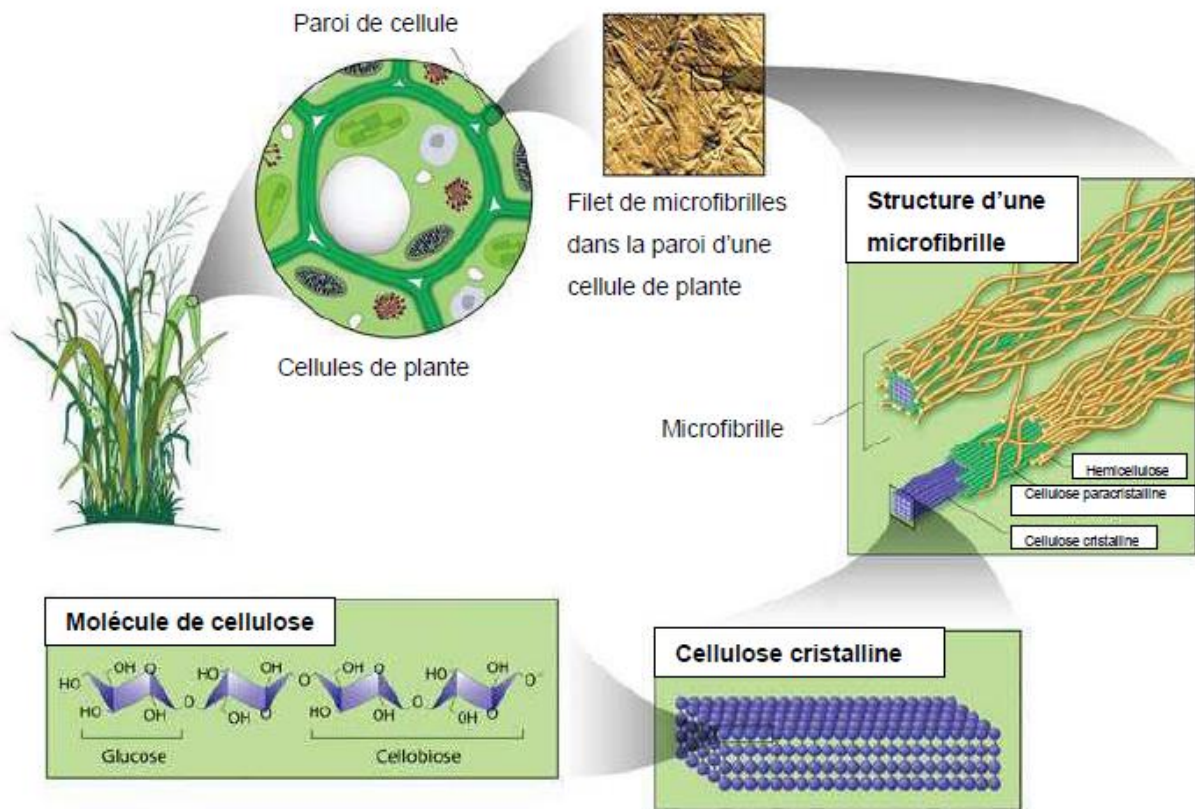
**Figure 12** : Représentation schématique d'une chaîne de cellulose.

Chaque monomère comporte trois groupes hydroxyl. Grâce à leur capacité à former des liaisons hydrogène, ils jouent un rôle majeur dans les propriétés physiques de la cellulose. La microfibrille de cellulose est l'élément de base de la fibre de cellulose, formée durant la biosynthèse. Les chaînes de poly-  $\beta$ -(1-4)-D-glucosyl s'agrègent pour former une fibrille, qui correspond à un assemblage de molécules stabilisées latéralement par des liaisons hydrogène intermoléculaires comme cela est montré sur la Figure 13.

Chaque fibre cellulosique est un composite dans lequel les microfibrilles sont fixées dans une matrice composée de lignine et d'hémicellulose. Ces microfibrilles de cellulose ont un diamètre allant de 2 à 20 nm. Chaque microfibrille peut être considérée comme un fil de cristaux de cellulose liés par des zones désordonnées amorphes le long de l'axe de la microfibrille.

Même si nous ne pouvons pas digérer la cellulose, nous lui trouvons de nombreuses utilisations, notamment : Le bois pour la construction ; produits en papier ; coton, lin et rayonne pour vêtements ; nitrocellulose pour explosifs ; acétate de cellulose pour films.

La cellulose alimentaire n'est pas digérée dans l'estomac et l'intestin grêle, 85 % étant récupérables dans le contenu d'iléostomies de sujets nourris avec des régimes contenant des aliments habituellement consommés. Dans le gros intestin cependant, il est fermenté par la microflore avec la production ultime d'acides gras à chaîne courte, d'hydrogène, de dioxyde de carbone et de méthane.



**Figure 13 :** Schéma de la paroi des cellules de cellulose et de l'organisation des microfibrilles.

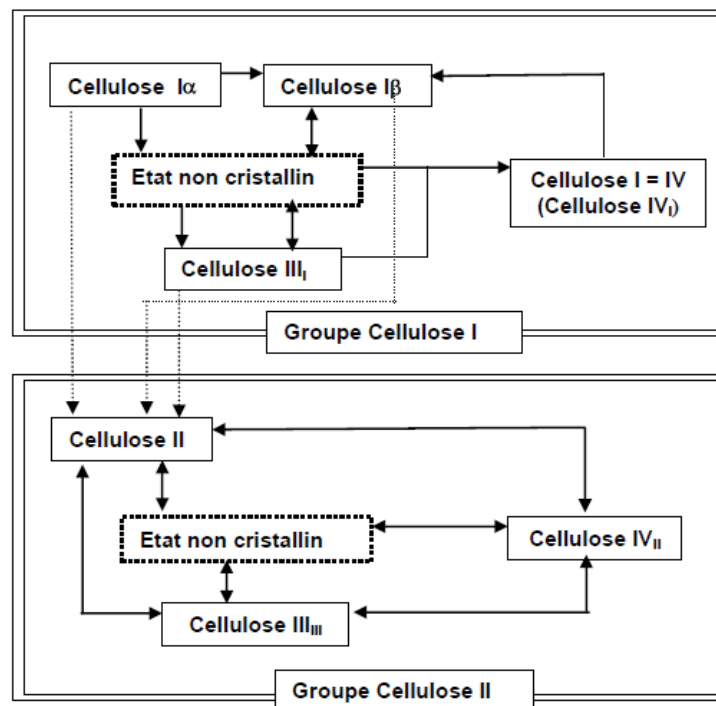
La cellulose est un excipient. Étant donné que les polysaccharides végétaux sont conformes à de nombreuses exigences attendues des excipients pharmaceutiques telles que la non-toxicité, la stabilité, la disponibilité et le renouvellement, ils sont largement étudiés pour une utilisation dans le développement de formes posologiques orales solides.

La cellulose peut être dérivée d'un certain nombre de sources en utilisant un certain nombre de techniques considérées comme synthétiques et certaines qui pourraient être considérées comme non synthétiques (naturelles). Diverses formes de cellulose ont de nombreuses autres utilisations autorisées par la FDA (Food and Drug administration), notamment en tant que substitut de graisse et agent de charge dans les aliments hypocaloriques, en tant que texturant, émulsifiant et diluant dans les produits alimentaires et obtenu sous forme de pâte à partir de matériaux fibreux tels que le bois ou du coton et bien qu'elle ait été utilisée dans des applications pharmaceutiques telles qu'une charge dans les comprimés, c'est la cellulose microcristalline qui représente une poudre de cellulose nouvelle et plus utile, principalement utilisée dans l'industrie pharmaceutique comme diluant/liant dans les comprimés.

La cellulose est insoluble dans l'eau et la plupart des solvants courants ; la faible solubilité est principalement attribuée à la forte liaison hydrogène intramoléculaire et intermoléculaire entre les chaînes individuelles. Malgré ses faibles caractéristiques de solubilité, la cellulose est utilisée dans un large éventail d'applications, notamment les composites, les filets, les tissus d'ameublement, les revêtements, les emballages, le papier, etc. La modification chimique de la cellulose est effectuée pour améliorer la capacité de traitement et produire des dérivés de la cellulose (cellulosiques) qui peuvent être adaptés pour des applications industrielles spécifiques. Les cellulosiques sont en général solides, reproductibles, recyclables et biocompatibles, étant utilisés dans diverses applications biomédicales telles que les membranes de purification du sang et autres.

La cellulose produite par les plantes est appelée cellulose native, qui se trouve sous deux formes cristallines, la cellulose I et la cellulose II. La cellulose II, généralement présente dans les algues marines, est une forme cristalline qui se forme lorsque la cellulose I est traitée avec de l'hydroxyde de sodium aqueux.

Parmi les quatre polymorphes cristallins différents que sont la cellulose I, II, III et IV, la cellulose I est thermodynamiquement moins stable tandis que la cellulose II est la structure la plus stable. Un traitement à l'ammoniac liquide de la cellulose I et de la cellulose II donne la forme cristalline de la cellulose III, et le chauffage de la cellulose III génère la forme cristalline de la cellulose IV (figure 14).



**Figure 14 :** Relations entre les différents allomorphes de la cellulose.

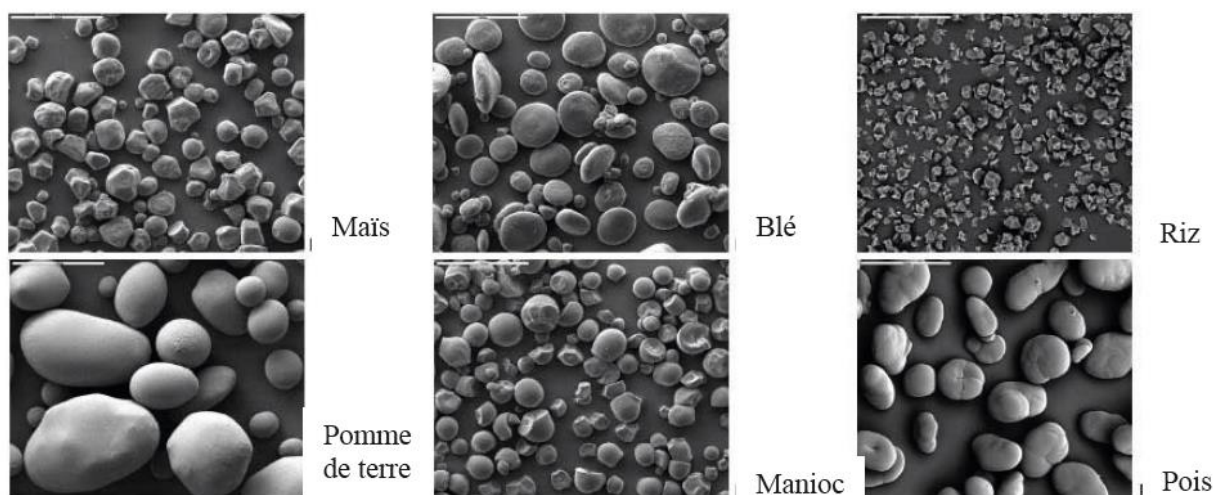
## *Différentes sources de cellulose*

- **Fibres naturelles** : Les fibres naturelles sont fabriquées à partir de sources végétales, animales et minérales. Les fibres naturelles peuvent être classées selon leur origine. Les fibres végétales sont généralement composées principalement de cellulose : par exemple le coton, le jute, le lin, la ramie, le sisal et le chanvre. Les fibres de cellulose servent à la fabrication du papier et du tissu.
- **Fibres synthétiques** : Les fibres synthétiques ou artificielles proviennent généralement de matériaux synthétiques tels que la pétrochimie. Mais certains types de fibres synthétiques sont fabriqués à partir de cellulose naturelle, notamment la rayonne, le modal et le Lyocell plus récemment développé. Les fibres de cellulose sont un sous-ensemble de fibres synthétiques, régénérées à partir de cellulose naturelle. La cellulose provient de diverses sources. Le modal est fabriqué à partir de hêtres, la fibre de bambou est une fibre cellulosique issue de bambou, la cellule marine est issue d'algues, etc. La bagasse est une fibre cellulosique issue de la canne à sucre.

## **2. L'amidon**

L'amidon est le principal polysaccharide de réserve des végétaux supérieurs. L'amidon est biosynthétisé sous forme de grains dont la taille, la forme et la structure cristalline dépendent de son origine botanique (figure 15). Il représente une fraction pondérale importante dans un grand nombre de matières premières agricoles comme les céréales (30% à 70%), les tubercules (60% à 90%) et les légumineuses (25% à 50%). 50% de l'amidon produit industriellement sont destinés à l'alimentation humaine. C'est un nutriment abondant, renouvelable, peu coûteux, qui trouve dans les aliments de multiples fonctions comme épaississant, gélifiant, liant sous sa forme d'empois d'amidon granulaire. Sous forme hydrolysée, l'amidon est utilisé comme matière sucrante, liante ; il fait partie des additifs alimentaires.

L'amidon, après extraction à partir des organes de réserve des végétaux supérieurs et purification se présente sous la forme d'une poudre blanche insoluble dans l'eau froide. Cette poudre est constituée d'entités microscopiques de 2 à 100µm de diamètre selon l'origine botanique, nommés grains d'amidon.



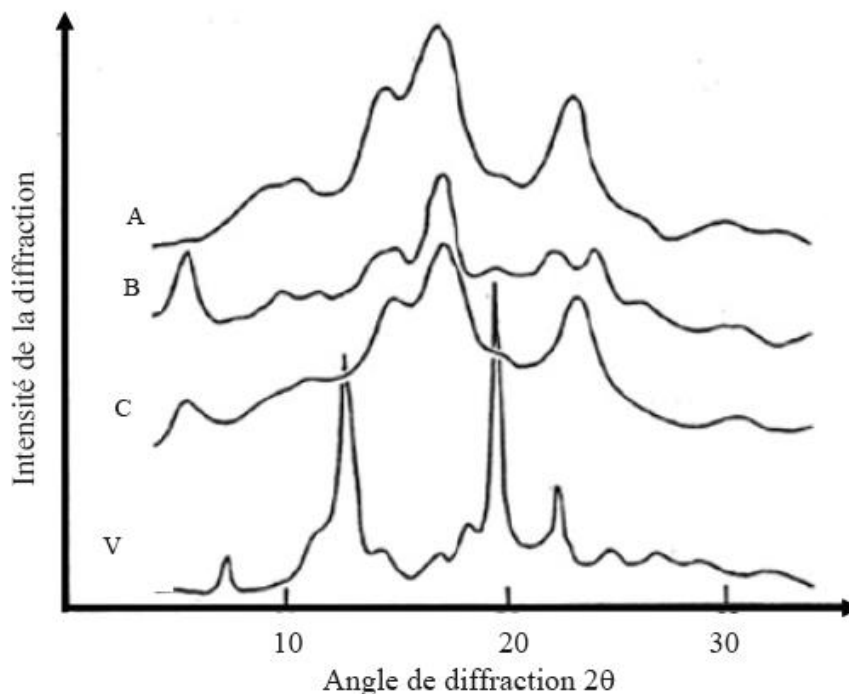
**Figure 15** : Formes et tailles des granules d'amidon de maïs, blé, riz, pomme de terre, manioc et de pois.

Les grains d'amidon ont une structure sphéroïdique avec une orientation moyenne radiale de leurs deux constituants macromoléculaires majeurs : l'amylose et l'amylopectine. Cette structure des grains d'amidon est faite de couches concentriques alternativement claires et sombres entourant un centre plus foncé appelé « hile » qui est le centre initial de croissance du grain. Ces stries correspondent à une succession de zones dites « amorphes », peu résistantes à l'hydrolyse, et de zones présentant une structure semi-cristalline comportant une alternance de lamelles cristallines. Ces lamelles cristallines sont composées des chaînes courtes (Shot) S de degré de polymérisation (DP) d'environ 15, de l'amylopectine et de lamelles amorphes composées en majorité des points de jonction des molécules d'amylopectine et éventuellement d'amylose.

L'empilement des lamelles cristallines et amorphes forme des ensembles appelés *blocklet* d'une taille comprise entre 300 et 500nm qui s'assembleraient pour constituer les couches cristallines. La grosseur, la forme et la structure des graines varient selon la plante d'où provient l'amidon.

### ➤ Classification des amidons natifs

Les amidons natifs peuvent être classés en quatre groupes (A, B, C et V) selon leur diffractogramme (figure 16). Le type A est caractéristique des amidons de céréales (amidon de blé et de maïs cireux). Le type B se retrouve principalement dans des amidons de tubercules et de céréales riches en amylose. Enfin, le type C correspond aux amidons des légumineuses. Il s'agit d'un mélange des deux types cristallins A et B. Le type V, de l'allemand "Verkleiterung", est observé lors de la formation de complexes entre l'amylose et une molécule complexante (iode, alcools, cyclohexane, acides gras...).



**Figure 16** : Diagrammes de diffraction des rayons X des types cristallins A, B, C et V.

### ➤ Structure chimique de l'amidon

L'amidon est à 98-99% essentiellement un homopolymère de D-glucose dans sa conformation chaise la plus stable ( ${}^4C_1$ ), les groupements hydroxyles C2, C3, C4 et C6 étant en position équatoriale (figure 17). Les unités monomériques de D-glucose sont liées majoritairement par des liaisons de types  $\alpha$  : (1→4) (95-96%) et dans une moindre mesure par des liaisons de types  $\alpha$  : (1→6) (4-5%). Chaque molécule possède en son extrémité C1 une fonction pseudo aldéhydrique réductrice. La fraction glucidique est un mélange de deux polymères aux structures primaires très différentes : l'amylose, molécule essentiellement linéaire (figure 18) et l'amylopectine, molécule ramifiée (figure 19).

L'amylose est un polymère essentiellement constitué d'unités de D-glucose liées par des liaisons de types  $\alpha$  : (1→4). L'amylose natif contient en moyenne 500 à 6000 unités glycosylés en plusieurs chaînes (1 à 20) et d'un degré de polymérisation (DP) moyen de 500. Son poids moléculaire varie entre 200 000 et 800 000 Daltons. Il est responsable de plusieurs propriétés de l'amidon, notamment la synérèse et la rétrogradation.

L'amylopectine est le principal constituant glucidique de l'amidon (70-80%). Il s'agit d'une molécule ramifiée où les unités de D-glucose sont principalement liées par des liaisons de types  $\alpha$  : (1→4) et quelques liaisons de types  $\alpha$  : (1→6). L'amylopectine est caractérisée par des masses

moléculaires très élevées ( $10^7$  à  $10^8$  Daltons) qui dépendent de l'origine botanique, du cultivar et des conditions physiologiques lors de la synthèse.

La teneur en amylose des amidons de diverses origines botaniques est généralement comprise entre 17 et 35%, bien que de grandes variations au sein d'une même variété soient possibles. L'amylose granulaire purifiée contient également un certain nombre de constituants mineurs (protéines, lipides, minéraux) dont les teneurs sont fonction de l'origine botanique et de l'histoire technologique (séparation, séchage) de l'amylose. Ces constituants, bien que présents en faibles quantités (<1% MS), sont susceptibles de modifier le comportement général de l'amylose sans toutefois en changer les bases physico-chimiques. Deux types d'amylose sont alors identifiés. Les amyloses dites "cireux" (waxy), sont principalement constitués d'amylopectine et de seulement 0% à 8% d'amylose. Les amyloses "standards" en contiennent environ 75%.

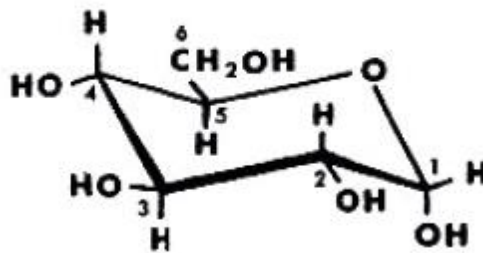


Figure 17 : Structure chimique du D-glucopyranose.

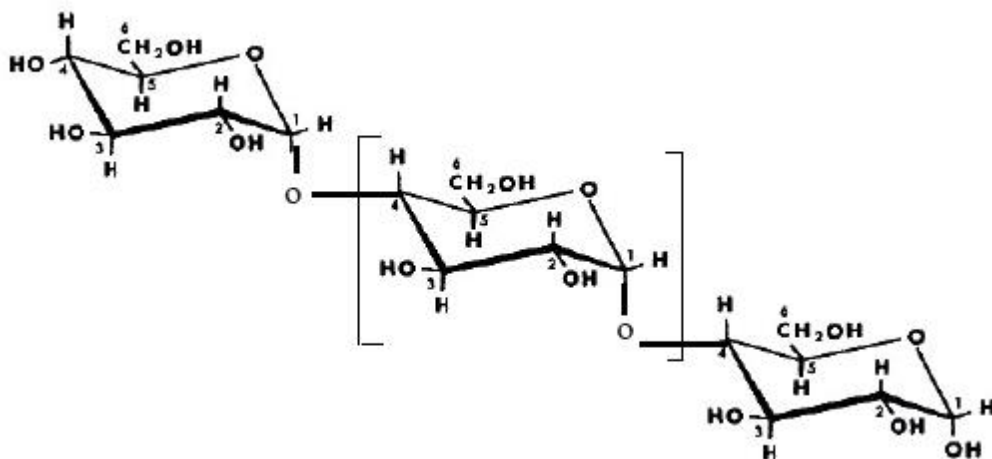
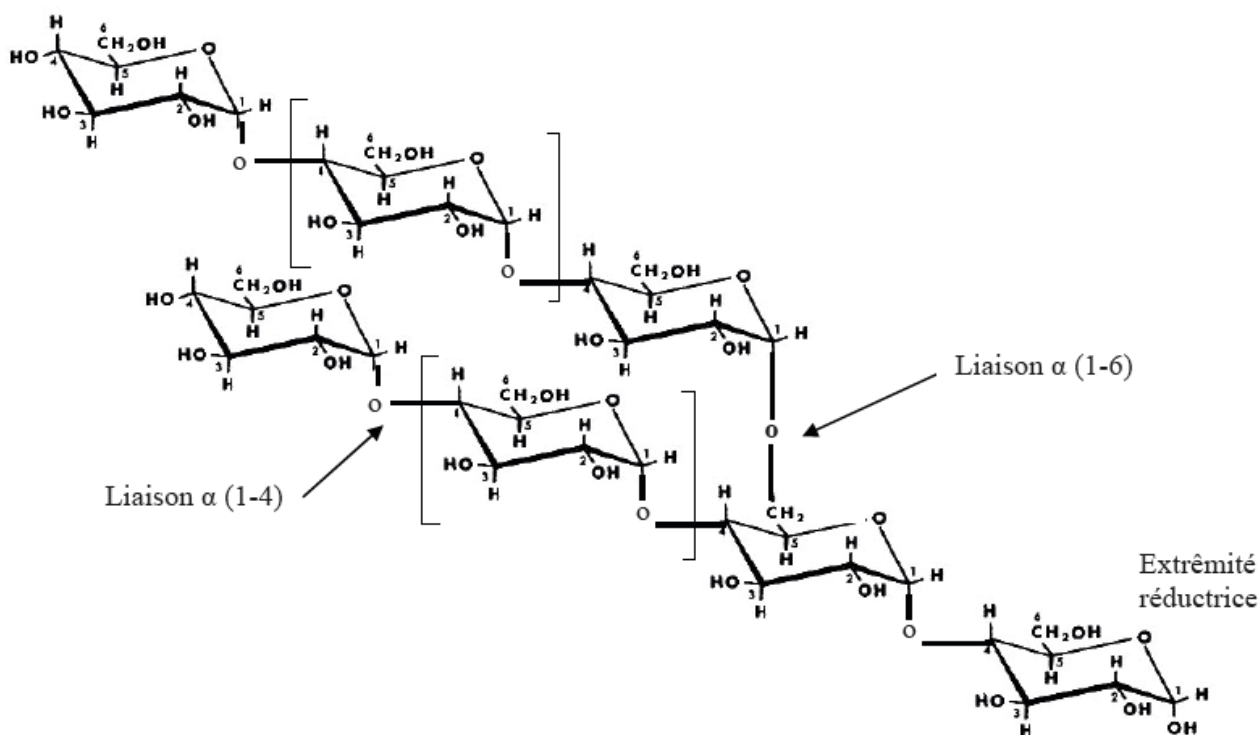


Figure 18 : Schéma simplifié de la structure chimique de l'amylose.





**Figure 19** : Schéma simplifié de la structure chimique de l'amylopectine.

L'amidon peut également contenir un matériel intermédiaire qui est un ensemble de chaînes de structure intermédiaire entre l'amylose et l'amylopectine de degré de polymérisation 15 et 45. Le tableau ci-dessous donne les teneurs en amylose et en amylopectine de quelques amidons naturels.

**Tableau 14** : Teneurs (% MS) en amylose et en amylopectine d'amidons naturels.

	Amylose	Amylopectine
Pomme de terre	23	77
Manioc	20	80
Blé	20	80
Riz	15 à 35	65 à 85
Sorgho	25	75
Maïs	25	75
Maïs céréux *	0	100
Amylomaïs*	77	23
Banane	17	83

\*obtenus par modifications génétiques.

## 2.1. Phénomène de gélification et rétrogradation

La rétrogradation désigne les réorganisations structurales (ou recristallisation) qui s'opèrent lors du refroidissement d'une dispersion d'amidon déstructuré lorsque la température de traitement est supérieure à la température de transition vitreuse ( $T_g$ ).

Les empois d'amidon obtenus à la suite d'un traitement thermique au-delà de 100 °C, en présence d'un excès d'eau, sont instables à température ambiante. Au cours du refroidissement de l'amidon gélatinisé, les macromolécules d'amylose et d'amylopectine se réorganisent et tendent à adopter un nouvel équilibre conformationnel, ce qui donne lieu au phénomène de rétrogradation qui conduit à la formation d'un gel composite. Les réarrangements de l'amylose semblent être à la base des modifications qui ont lieu au cours du refroidissement des empois juste après la gélatinisation. Ces réarrangements sont responsables du développement de la texture du gel, qui sera d'autant plus rigide que la concentration en amylose sera importante. Il est à noter que la gélification de l'amylose est un processus cinétique dont la rapidité va dépendre de la concentration en amidon ainsi que de sa teneur en amylose.

## 2.2. Comportement rhéologique

La caractérisation rhéologique des empois et gels d'amidon se fait sur les mêmes bases qu'il s'agisse d'amidons natifs ou modifiés. La détermination des propriétés rhéologiques d'une suspension d'amidon non gélatinisée est difficile à cause de la sédimentation des granules au cours de la mesure et aussi de la faible viscosité. Les mesures des propriétés rhéologiques après empesage de l'amidon, permet l'obtention d'un système, assez complexe, composé de grains d'amidon gonflés dans un milieu continu formé, éventuellement de macromolécules solubilisées.

Le comportement rhéologique des empois d'amidon est affecté par la taille, la forme et la distribution de taille des grains gélatinisés, ainsi que les interactions entre les grains, la viscosité de la phase continue, et la vitesse et le temps de déformation. Le comportement rhéologique des empois d'amidon est connu pour être le résultat de deux caractéristiques principales : la viscosité de la phase continue et la fraction volumique de la phase dispersée.

La viscosimétrie conduit à l'établissement des courbes d'écoulement laminaire, reliant la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) et la vitesse de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ), en général, de  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$ . Tous les empois d'amidon ont un comportement rhéofluidifiant, ce qui se traduit par l'absence de relation linéaire entre  $\tau$  et  $\dot{\gamma}$  et une diminution du rapport  $\tau/\dot{\gamma}$  lorsque  $\dot{\gamma}$  augmente. Les courbes d'écoulement sont fonction de tous les facteurs susceptibles d'influencer les caractéristiques des empois d'amidon, et notamment de l'origine botanique de l'amidon, les pourcentages des fractions amylose et

amylopectine et des conditions de préparation de l'empois (cinétique de chauffage, intensité d'agitation). Elles fournissent des informations utiles à la compréhension du comportement rhéologique des amidons. Cependant, les bases moléculaires susceptibles d'expliquer les différences de comportement entre les amidons restent inexpliquées.

### 3. Propriétés fonctionnelles de l'amidon natif et amidons modifiés

Les amidons natifs correspondent au produit brut, extrait sans modification de structure moléculaire. Les principaux inconvénients des amidons natifs lors de leur utilisation en alimentation sont les suivants :

- formation d'un gel le plus souvent opaque ;
- mauvaise résistance aux traitements thermiques élevés, aux cisaillements (cutterage), au stockage prolongé à froid et surtout à la congélation ;
- mauvaise résistance à l'acidité, à un pH inférieur à 5 ; la température de gélatinisation diminue en même temps que la viscosité, entraînant une baisse du pouvoir liant et stabilisant ;
- ils nécessitent une cuisson

L'emploi des amidons natifs est réservé à des sauces soumises à des cuissons et à des traitements technologiques modérés et consommées rapidement après leur préparation. Les amidons natifs les plus utilisés sont la fécule de pomme de terre et l'amidon de maïs. La fécule de pomme de terre a une saveur plus marquée, de très bonnes qualités liantes, mais elle est fragile. Les amidons natifs (fécule de pommes) sont utilisés en charcuterie, les amidons réticulés aussi pour améliorer la texture, la rétention d'eau et la stabilité du produit fini. L'amidon pré-gélatinisé est utilisé dans les produits tels que les snacks extrudés pour favoriser l'expansion, la conservation de la forme et la croustillance. L'amidon pré-gélatinisé sert aussi dans les préparations instantanées. L'amidon fluidifié pour sa part est plus sollicité en confiserie pour assurer la texture de la gomme et sa stabilité.

Les amidons modifiés sont des produits obtenus au moyen d'un ou de plusieurs traitements, physiques et/ou chimiques d'amidons alimentaires. Ils peuvent avoir subi un traitement physique ou enzymatique, et avoir été blanchis ou fluidifiés par traitements acide ou alcalin. Les amidons modifiés sont issus des traitements de réticulation (création de nouveaux ponts entre les chaînes par des réactions d'estérification ou d'éthérification) ou de greffage (substitution des hydrogènes, des groupes hydroxyles par un radical chimique). Les amidons modifiés offrent une meilleure résistance aux températures élevées (appertisation), aux milieux acides (pH<5), aux traitements mécaniques (cisaillement) et au stockage à l'état congelé que les amidons natifs.

Pour expliquer les fonctions des amidons modifiés, ils seront considérés ici comme hydrocolloïdes. Les hydrocolloïdes sont des molécules qui, à faibles doses sont capables de se lier à une quantité importante d'eau, et par la présence de la phase aqueuse du produit alimentaire, de modifier son comportement. Cette modification rhéologique dépend également de la molécule : longueur, rigidité, possibilité d'association. Plusieurs paramètres entrent en jeu pour la détermination des conditions optimales d'utilisation des amidons modifiés. Entre autres, on tient compte de la dispersion, de la solubilisation et de l'influence du traitement appliqué lors de leurs utilisations.

La première étape d'une bonne utilisation des hydrocolloïdes consiste à faire en sorte que chaque grain arrive individuellement au contact de la phase aqueuse et réagisse sans risque de s'agglomérer aux autres grains pour former des grumeaux : c'est **la dispersion**. Dans un second temps, il faut passer du grain à l'individualisation des molécules de celui-ci : c'est **la solubilisation**. Pour cela, il faut que chaque macromolécule s'hydrate et se sépare des autres.

Les préparations alimentaires contenant des amidons modifiés sont très variées. Les secteurs concernés par l'utilisation d'amidons modifiés sont nombreux : boulangerie-pâtisserie, boissons, produits laitiers, glaçages, nappages, sauces et aliments infantiles, préparations à base de poisson ou de viande. Les propriétés apportées par les amidons modifiés sont de différents types : viscosité et stabilité (produits laitiers), texture et rhéologie, amélioration de la sensation en bouche (visée par exemple dans la nourriture pour enfant) et aspect visuel (nappage).

#### 4. Les enzymes amylolytiques et leur utilisation

La famille GH13 est la famille qui présente le plus de diversité de fonction dans le groupe des enzymes clivant les liaisons  $\alpha$ -glycosidiques. Se trouvent ainsi regroupées des enzymes qui catalysent le clivage ou la synthèse de liaisons  $\alpha$  -1,4,  $\alpha$  -1,6 et plus rarement les liaisons  $\alpha$  -1, 2 et  $\alpha$  -1,3-glycosidiques et qui peuvent agir sur une large variété de substrats tels que l'amylose, l'amidon, le glycogène, les maltooligosaccharides ou encore le saccharose et le tréhalose. Les différentes activités amylolytiques regroupées dans la famille GH13 comprennent :

- **Les Glucohydrolases spécifiques des liaisons  $\alpha$  -1,4** : regroupant les activités  $\alpha$ -amylase (EC 3.2.1.1),  $\alpha$ -glucosidase (EC 3.2.1.20), maltogenic amylase (EC 3.2.1.133), maltotetraose-forming  $\alpha$ -amylase (EC 3.2.1.60), cyclomaltodextrinase (EC 3.2.1.54), maltohexaose-forming  $\alpha$ -amylase (EC 3.2.1.98), maltotriose-forming  $\alpha$ -amylase (EC 3.2.1.116), neopullulanase (EC 3.2.1.135) et maltopentaose-forming  $\alpha$ -amylase (EC 3.2.1.-) ;
- **Les Glucohydrolases spécifiques des liaisons  $\alpha$  -1,6** : regroupant les activités iso-amylase (EC 3.2.1.68), oligo  $\alpha$  -1,6-glucosidase (EC 3.2.1.10) et pullulanase (EC 3.2.1.41).

- **Les trehalose-6-phosphate hydrolases** (EC 3.2.1.93) sont également classées au sein de la famille GH13.
- **Les Transglucosidases**: regroupant les activités amyloamylase (EC 2.4.1.25), cyclodextrine glucanotransférase (EC 2.4.1.19), amylosaccharase (EC 2.4.1.4), saccharose phosphorylase (EC 2.4.1.7) et des enzymes de branchement (EC 2.4.1.18).
- **Les Isomérases** : regroupant les activités trehalose synthétase (EC 5.4.99.16), isomaltulose synthase (EC 5.4.99.11).

## 5. Les fibres alimentaires

Eben Hipsley a été la première personne à utiliser le terme fibres alimentaires en 1953, il a observé que les personnes ayant un régime riche en aliments riches en fibres avaient tendance à avoir des niveaux de toxémie de grossesse plus faibles. Auparavant, le terme analytique « fibre brute » était utilisé pour désigner la portion d'aliments végétaux qui échappait aux extractions aux solvants, aux alcalis et aux acides. Ces termes ont été utilisés de manière interchangeable, mais les fibres alimentaires sont définies comme des complexes glucidiques qui fournissent la structure rigide de la paroi cellulaire végétale et échappent à la digestion et à l'absorption dans le tractus gastro-intestinal humain supérieur, tandis que les fibres brutes sont la partie restante des fibres alimentaires (principalement la lignine et la cellulose) après avoir été traité avec un acide et un alcali.

Les bienfaits pour la santé et les effets physiologiques des fibres alimentaires sont difficiles à prévoir sur la seule base de leurs caractéristiques structurales ; cependant, ils peuvent être prédits sur la base de propriétés physico-chimiques et fonctionnelles. Ainsi, les propriétés physiologiques des fibres alimentaires dépendent d'une combinaison complexe d'attributs physiques, chimiques et structurels.

Les fibres alimentaires sont constituées de formes insolubles et solubles dont les attributs physiologiques et physico-chimiques varient. Les fibres alimentaires solubles se caractérisent par leur solubilité dans l'eau et leur viscosité, qui abaissent légèrement les concentrations sanguines de cholestérol et de triacylglycérides et atténuent la réponse glycémique postprandiale. Les fibres alimentaires insolubles se caractérisent par leur porosité et leur densité et leur capacité à augmenter la masse fécale et à diminuer le temps de transit intestinal, améliorant ainsi le péristaltisme intestinal. Le mécanisme de réduction de l'hyperglycémie postprandiale des fibres alimentaires est l'effet retardateur direct sur l'absorption du glucose dans le tractus gastro-intestinal en raison d'une modification de la diffusion de la digestion du produit final dans la lumière. Ainsi, les formes visqueuses de fibres alimentaires peuvent altérer les événements (tels que le taux d'absorption du glucose) se produisant dans le tractus gastro-intestinal.

## 5.1. Cas des pectines

La pectine est la famille de polysaccharides la plus structurellement complexe dans la nature, constituant 35 % des parois primaires des dicotylédones et des monocotylédones non graminées, 2 à 10 % des parois primaires des graminées et autres comme linoïdes, et jusqu'à 5 % des parois des tissus ligneux. La pectine est abondante dans les parois qui entourent les cellules en croissance et en division, les parois des cellules dans les parties molles de la plante, et dans les lamelles moyennes et les coins des cellules. La pectine est également présente dans la zone de jonction entre les cellules avec des parois secondaires comprenant des cellules de xylème et de fibres dans le tissu ligneux.

Les pectines sont une famille de polysaccharides de paroi cellulaire végétale riches en acide galacturonique liés de manière covalente. L'acide galacturonique comprend environ 70 % de pectine, et tous les polysaccharides pectiques contiennent de l'acide galacturonique lié en position *O*-1 et *O*-4. Le polysaccharide pectique le plus abondant est l'homogalacturonane (HG), un homopolymère linéaire d'acide galacturonique à liaison  $\alpha$ -1,4 qui comprend 65% de pectine. Les autres polysaccharides pectiques ont une structure considérablement plus complexe que HG et comprennent les HG substitués rhamnogalacturonane II (RG-II) (Figure 1b), xylogalacturonane (XGA) et apiogalacturonan (AP), ainsi que le polysaccharide pectique structurellement plus variable rhamnogalacturonane I. La pectine la plus structurellement complexe, RG-II, représente 10 % de la pectine.

La pectine est principalement utilisée dans l'industrie agroalimentaire et pharmaceutique pour ses propriétés physiques. Ces propriétés sont généralement dépendantes de sa structure. La structure de la pectine la rend insoluble dans les solvants organiques et soluble dans l'eau. La solubilité dans l'eau est généralement dépendante de la distribution des groupements méthoxylés ( $\text{OCH}_3$ ) et de la masse molaire. La solubilité de la pectine augmente avec la diminution du degré de méthylation et pour les petites masses molaires de pectine. De plus, la présence de groupements chargés sur le polymère entraîne des répulsions électrostatiques entre ces groupements chargés, ce qui diminue la formation d'agrégats et facilite sa solubilité. L'ionisation de ces groupements se réalise lorsque la pectine est dans une solution au pH supérieur au pKa des fonctions carboxyliques de la pectine ( $\text{pKa} \approx 3,5$ ). Ainsi, un pH supérieur à 5,5 favorise la solubilisation de la pectine. La pectine se solubilise grâce à 3 étapes successives : hydratation, gonflement et dissolution.

Les stabilisants sont des additifs qui permettent de maintenir l'état physico-chimique du produit. Ils stabilisent les phases non miscibles entre elles et évitent la séparation des constituants du produit. Trois stratégies sont envisageables pour obtenir cette propriété. La première consiste à augmenter la viscosité de la solution. La deuxième crée un réseau assurant le maintien en suspension des particules. La troisième masque les éléments qui peuvent interagir entre eux. Cette dernière est

utilisée dans le cas des boissons lactières acides contenant des protéines, comme la caséine. En effet, ces protéines ont tendance à s'agréger, puis à sédimenter sous l'effet de l'acidité du milieu. A pH acide, ces particules se chargent de façon dipolaire entraînant une attraction entre elles. Or, en présence de pectine, ces chaînes interagissent avec les charges positives des particules les empêchant de s'agglomérer. Pour un  $\text{pH} < 4,6$  les molécules de caséine vont se charger en partie positivement ( $\text{pK}_i \text{ caséine} = 4,6$ ) et former des particules dipolaires. Ces particules vont interagir entre elles en absence de pectine, puis précipiter.

La viscosité est la grandeur qui relie le taux de cisaillement à la contrainte. Les agents dits viscosifiants ont la propriété de modifier le comportement de la phase continue, sans former des zones de jonction contrairement aux gélifiants et certains stabilisants. La pectine HM (degré de méthylation varie entre 60 et 90%) possède cette caractéristique due à son haut poids moléculaire. Ainsi, on retrouve son utilisation dans les boissons fruitées.

## 5.2. La gélification

La gélification est un procédé qui consiste à former un gel. On peut définir un gel comme "un système colloïdal : les molécules gélifiantes sont des macromolécules qui forment un réseau en se solvant. Ce réseau tridimensionnel solide contient entre ses mailles une phase liquide". La gélification des pectines HM est permise par un ensemble de liaisons hydrogènes et d'interactions hydrophobes formant un réseau tridimensionnel, comprenant un solvant. Le pH est un facteur affectant la gélification de la pectine. Lorsqu'il est inférieur au  $\text{pK}_a$  des fonctions carboxyliques des acides galacturoniques ( $\text{pK}_a \approx 3,5$ ), ces fonctions se retrouvent sous la forme non-ionisée, favorisant la formation de liaisons hydrogènes. La pectine LM possède moins de 50% de fonctions carboxyliques qui sont estérifiées. Celle-ci possède des interactions similaires à la pectine HM (liaisons hydrogènes et liaison hydrophobes). Cependant, la pectine LM est capable de former des liaisons de coordination en présence de cations donnant naissance à un réseau.

Les gels font référence aux ingrédients viscoélastiques, qui possèdent des caractéristiques allant des liquides aux solides, selon la période expérimentale. L'industrie alimentaire préfère les fibres alimentaires solubles aux fibres alimentaires insolubles en raison de la formation de gel et de l'émulsification et en tant qu'ingrédient dans les aliments et les boissons sans affecter le goût. Les fibres alimentaires peuvent être utilisées comme épaississants dans plusieurs produits tels que les gelées, les confitures ou les marmelades et aident également à éviter la synérèse dans les produits, à maintenir la stabilité de la texture et la formation de gel, et à améliorer la qualité du produit. Par exemple, les fibres alimentaires de pêche ont été utilisées dans les confitures pour fournir la propriété fonctionnelle requise.

En 2018, Figueroa et Genovese ont lancé une étude dont l'objectif était d'évaluer l'effet de l'ajout de fibres alimentaires de différentes sources (pomme, bambou, psyllium et blé) et de fraction massique de pectine (0,4 et 0,5 g/100 g) sur les propriétés physico-chimiques des gels de pectine pour le développement d'un nouveau produit sain semblable à une confiture de confiserie de fruits. Ils ont trouvé que l'ajout de fibres a eu un effet renforçant sur les propriétés viscoélastiques des gels de pectine (blé>psyllium>bambou>pomme).



## Chapitres 5 : Systèmes alimentaires

### 1. Aspects généraux

Les systèmes alimentaires ont généralement été conceptualisés comme un ensemble d'activités allant de la production à la consommation, souvent représentées comme une chaîne de valeur. Cependant, l'attention croissante portée à la sécurité alimentaire a également élargi la compréhension des systèmes alimentaires. La sécurité alimentaire est une question complexe, englobant des éléments de disponibilité, d'accès et d'utilisation, avec de multiples déterminants environnementaux, sociaux, politiques et économiques.

Un système alimentaire est constitué de l'ensemble des éléments (environnement, individus, apports, processus, infrastructures, institutions, etc.) et des activités liées à la production, à la transformation, à la distribution, à la préparation et à la consommation des denrées alimentaires, ainsi que du résultat de ces activités, notamment sur les plans socioéconomique et environnemental. La figure 20 définit cinq grandes catégories de facteurs déterminant l'évolution des systèmes alimentaires : facteurs biophysiques et environnementaux ; l'innovation, les technologies et l'infrastructure ; facteurs politiques et économiques ; facteurs socioculturels ; et facteurs démographiques.

Les facteurs biophysiques et environnementaux sont les ressources naturelles et les services écosystémiques, ainsi que le changement climatique. Les facteurs politiques et économiques sont l'impulsion politique, la mondialisation, l'investissement étranger et le commerce, les politiques alimentaires, le régime foncier, les prix des aliments et la volatilité des prix, les conflits et les crises humanitaires. Les facteurs socioculturels sont la culture, la religion, les rituels, les traditions sociales et le degré d'autonomisation des femmes. Enfin, les facteurs démographiques sont la croissance de la population, l'évolution de la pyramide des âges, l'urbanisation, les migrations et les déplacements forcés.

Les systèmes alimentaires, leurs facteurs, leurs acteurs et leurs éléments n'existent pas isolément ; ils interagissent entre eux et avec d'autres systèmes (notamment ceux des secteurs de la santé, de l'énergie et du transport). Ces systèmes sont interconnectés et soumis à des cycles adaptatifs continus de croissance, de restructuration et de renouvellement.

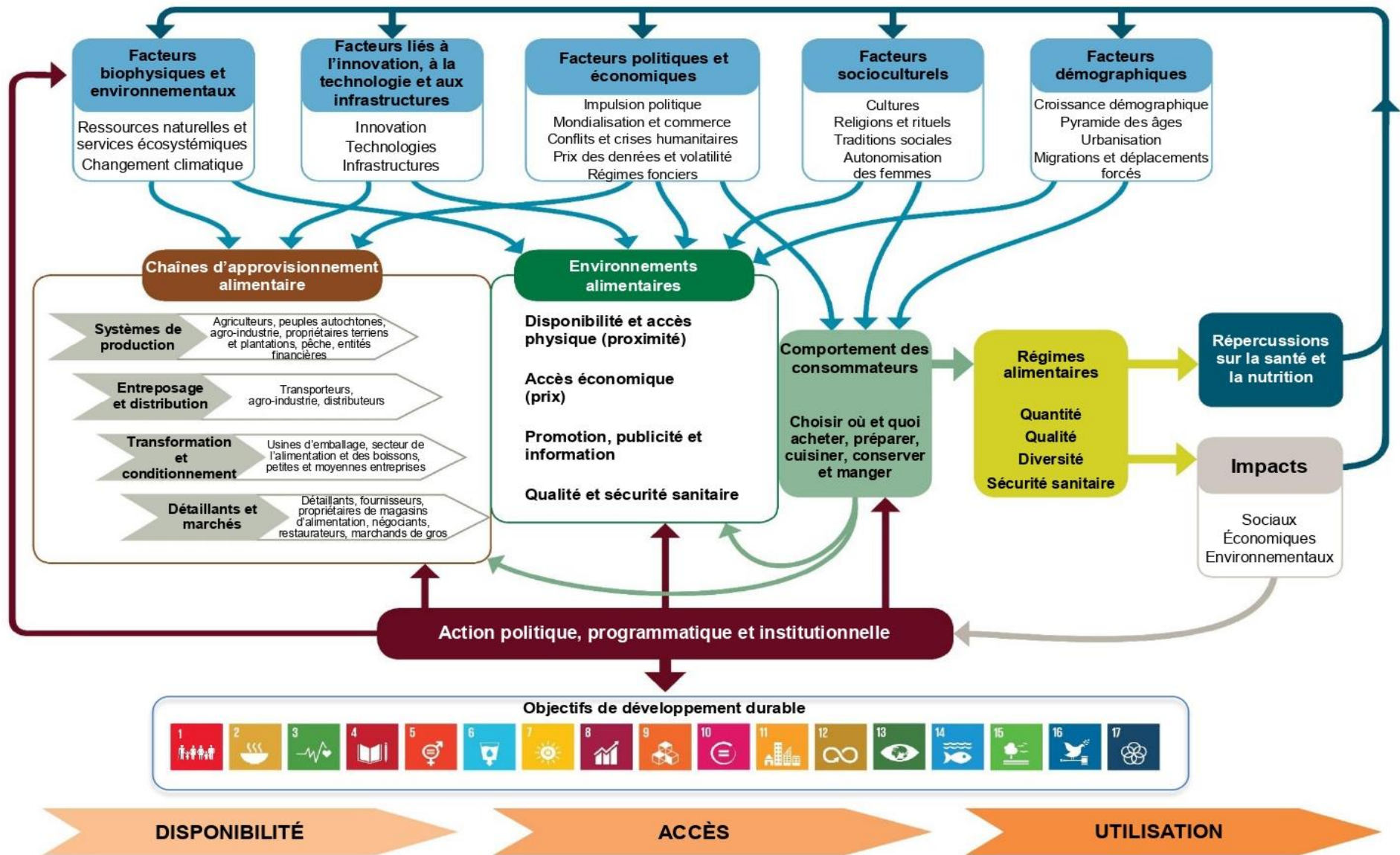


Figure 20 : Cadre conceptuel des systèmes alimentaires – régimes alimentaires et nutrition.

## 2. Système alimentaire d'origine végétale

### 2.1. Métabolites primaires et secondaires

Le métabolisme peut être défini comme la somme de toutes les réactions biochimiques effectuées par un organisme. Les métabolites sont les intermédiaires et les produits du métabolisme et sont généralement limités à de petites molécules. Le métabolisme dit primaire correspond aux réactions et aux métabolites qui sont indispensables au fonctionnement cellulaire et donc à la croissance et au développement de l'organisme producteur. On y retrouve notamment les glucides, les lipides ou encore les acides nucléiques qui sont conservés parmi les êtres vivants. Les métabolites primaires tels que les acides aminés, les acides organiques ou les nucléosides font partie des produits biotechnologiques les plus simples et sont couramment utilisés comme matières premières pour d'autres processus tels que la fermentation ou les synthèses chimiques.

A l'inverse, le métabolisme secondaire implique les réactions et les métabolites qui ne sont pas nécessaires à la croissance d'un organisme. Un métabolite secondaire, aussi parfois appelé produit naturel, peut être produit par un nombre restreint d'espèces au sein d'un genre, d'un ordre ou d'un phylum et dans certains cas seules certaines souches d'une même espèce possèdent la capacité de produire une molécule. Les métabolites secondaires sont principalement produits par les plantes, les bactéries (particulièrement les Actinomycètes) et les champignons filamenteux. A l'inverse, les levures, les protozoaires et les animaux ne produisent des métabolites secondaires que dans de rares cas.

Plus de 2 140 000 métabolites secondaires sont connus et sont généralement classés en fonction de leur grande diversité dans leur structure, leur fonction et leur biosynthèse. Il existe cinq classes principales de métabolites secondaires tels que les terpénoïdes et les stéroïdes, les substances dérivées des acides gras et les polycétides, les alcaloïdes, les polypeptides non ribosomiques et les cofacteurs enzymatiques.

#### ➤ *Terpénoïdes et stéroïdes*

Ils constituent un groupe majeur de substances dérivées par biosynthèse du diphosphate d'isopentényle. Actuellement, plus de 35 000 composés terpénoïdes et stéroïdes connus sont identifiés. Les terpénoïdes ont différentes variétés de structures non apparentées, tandis que les stéroïdes ont un squelette carboné tétracyclique commun et sont des terpénoïdes modifiés qui sont biosynthétisés à partir du lanostérol triterpénique.

➤ **Alcaloïdes**

Il existe plus de 12 000 composés connus d'alcaloïdes, et leurs structures de base sont constituées d'un groupe amine basique et sont dérivées par biosynthèse d'acides aminés.

➤ **Substances dérivées d'acides gras et polycétides**

Environ 10 000 composés sont identifiés et sont biosynthétisés à partir de précurseurs acyles simples tels que le propionyl CoA, l'acétyl CoA et le méthylmalonyl CoA.

➤ **Polypeptides non ribosomiques**

Ces composés dérivés d'acides aminés sont synthétisés biologiquement par un complexe enzymatique multifonctionnel sans transcription directe d'ARN.

➤ **Cofacteurs enzymatiques**

Les cofacteurs enzymatiques sont des composants enzymatiques non protéiques de faible poids moléculaire.

Les principales fonctions des métabolites secondaires, y compris les antibiotiques, sont :

- (i) armes compétitives contre d'autres êtres vivants tels que les animaux, les plantes, les insectes et les micro-organismes ;
- (ii) agents de transport de métaux ;
- (iii) agents de relation symbiotique avec d'autres organismes ;
- (iv) agent reproducteur et
- (v) effecteurs de différenciation ;
- (vi) agents de communication entre organismes.

## **2.2. Céréales, légumineuses, fruits et légumes, algues**

### ***Céréales***

En considérant le grain entier de diverses céréales, on constate une grande analogie dans leur composition chimique mais aussi quelques différences (Tableau 15). Dans toutes les espèces, le grain est essentiellement glucidique avec 60 à 75 % de glucides digestibles (amidon principalement). Les céréales apparaissent ainsi comme des aliments essentiellement énergétiques : 330 à 385 kcal/100 g.

Le taux de fibre diététique est variable (2 à plus de 30 %). Il dépend notamment de l'aille du grain, les grains de faibles dimensions (petits mils) ayant une plus grande proportion l'enveloppes.

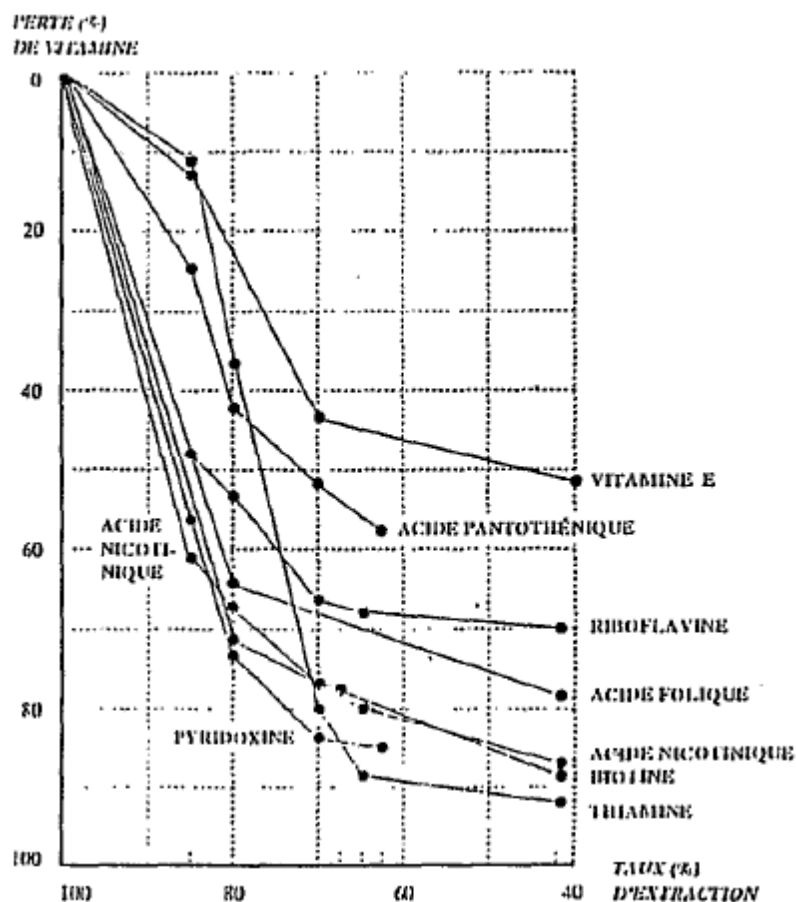
La teneur en protéines va de 6 à 18 % dans les cas extrêmes mais se situe le plus souvent entre 8 et 13 %. Malgré cette modicité relative, les céréales réalisent souvent à elles seules un apport protidique très important en raison de leur prépondérance dans la ration de nombreuses populations. Qualitativement, ces protéines sont médiocres : l'acide aminé limitant est la lysine ; dans le cas du maïs, le tryptophane présente également un grave déficit et constitue l'acide aminé limitant secondaire. La concentration des acides aminés soufrés est plus élevée que dans les légumineuses, d'où l'intérêt de l'association des céréales et des légumineuses qui se supplémentent ainsi mutuellement. Les lipides sont relativement peu abondants mais ils sont extrêmement intéressants par la forte proportion des acides gras polyinsaturés.

Les céréales sont peu minéralisées : la teneur en phosphore est élevée, celle du calcium est faible (sauf pour l'éleusine), et ne suffit pas à neutraliser tout l'acide phytique. L'acide phytique insolubilise également Mg, Zn, Fe. A l'exception du maïs jaune et de certains mils qui contiennent des caroténoïdes actifs, les céréales n'ont pas d'activité vitaminique A. La vitamine C fait défaut également. Les germes sont riches en vitamine E. Les vitamines du groupe B sont présentes (à l'exception de la vitamine B12, mais décorticage et blutage en éliminent une bonne partie.

**Tableau 15 :** Composition des céréales (pour 100 g de grain à 10 % d'humidité).

	<b>Blé</b>	<b>Sorgho</b>	<b>Mil</b>	<b>Maïs</b>	<b>Riz brun</b>
Protéines (g)	13	11	10,6	9,5	8,3
Lipides (g)	1,8	3,2	4,1	4	1,6
Glucides disponibles (g)	61,6	59,3	73,2	66	75
Fibres diététiques (g)	11	14,5		9	4
Calcium (mg)	60	26	22	16	22
Phosphore (mg)	312	330	286	220	250
Fer (mg)	7,6	10,6	20,7	3,6	2
Thiamine (vit. B1) (mg)	0,35	0,34	0,3	0,33	0,36
Riboflavine (vit.B2) (mg)	0,12	0,15	0,22	0,1	0,06
Niacine (vit. PP) (mg)	6,1	5,3	4,7	3,1	7
Pyridoxine (vit. B6) (mg)	0,5			0,4	0,67
Acide pantothénique (mg)	0,8	1,2	1,25	0,65	1,7
Biotine (mg)	7			6	12

L'usage alimentaire des céréales présente un double écueil : si on consomme la farine de mouture intégrale, c'est-à-dire la céréale entière, la présence d'une quantité importante de fibre, d'acide phytique et parfois de tanins (cas de certains sorghos) entraîne une nette diminution de la digestibilité de l'ensemble de la ration et, par la même, la perte notable de nutriments essentiels : protéines, minéraux, vitamines. En revanche, si l'on raffine à l'extrême la farine pour obtenir un produit correspondant au seul albumen, on consomme un aliment très énergétique car riche en amidon, d'une digestibilité élevée, mais appauvri en protéines, minéraux et vitamines. De plus, comme les protéines de haute valeur biologique se trouvent dans l'assise à aleurone, la farine très raffinée est appauvrie quantitativement et qualitativement (Figure 21).



**Figure 21 :** Relation entre le taux d'extraction et l'appauvrissement d'une farine en vitamines.

### *Légumineuses*

Les légumineuses constituent une grande famille (Fabaceae) qui regroupe des plantes à visée ornementale (pois de senteur), fourragère (trèfle) et, bien sûr, alimentaire. Ces dernières se répartissent en 3 groupes : les « légumes secs » (lentilles, pois cassés, pois chiches, fèves, haricots secs ...), les oléagineux (arachide, soja ...) et les légumes à cosse (petit pois, haricots verts ...).

Les légumineuses sont caractérisées à la fois par une forte densité énergétique et une forte densité nutritionnelle. La principale caractéristique des graines de légumineuses est leur teneur élevée en protéines (20-40% du produit sec, 7-15% du produit prêt à consommer) (Tableau 16). La qualité nutritionnelle d'une protéine se définit en premier lieu par sa composition en acides aminés, et sa digestibilité. Les protéines de légumineuses sont généralement riches en acides aminés indispensables et en particulier en lysine, mais elles sont relativement pauvres en acides aminés soufrés et en tryptophane (Tableau 17). A ce titre, elles complètent très bien les protéines des céréales, généralement pauvre en lysine. Complémentarité que l'on retrouve dans de nombreux plats traditionnels (couscous, dal bhat ...). La digestibilité des protéines végétale est souvent considérée inférieure à celle des produits animaux. Cette plus faible digestibilité est attribuée à la structure de la graine qui protège les protéines de l'attaque des enzymes digestives, et à la présence de composés qui bloque l'activité protéolytique de ces enzymes (facteurs antitrypsiques, tannins, ...). La cuisson entraîne une fragilisation de la structure de la graine, et une inactivation des inhibiteurs de protéase, améliorant ainsi la digestibilité des protéines. La fermentation des graines avant cuisson permet également de réduire sensiblement l'activité de ces enzymes.

Les graines de légumineuses peuvent se répartir en deux groupes. Le premier groupe correspond à des graines riches en glucides, et notamment en amidon (40-50% du produit sec), et pauvres en matières grasses (1-6% du produit sec), c'est le groupe le plus important et il rassemble entre autres le pois, la fève, les haricots secs, le pois chiche, les lentilles, la cornille, le dolique et le pois bambara. Le second groupe correspond à des graines plus riches en matières grasses et contenant peu d'amidon. Ce groupe rassemble notamment le lupin et le soja qui contiennent respectivement 10 et 20% de lipides. Les légumineuses ont des teneurs naturellement faibles en acides gras saturés, et parce qu'elles sont des aliments végétaux, elles sont également exemptes de cholestérol. Ces végétaux ont également un faible indice glycémique, généralement compris entre 10 et 40.

Les graines de légumineuses constituent également une source importante de fibres, de vitamines du groupe B (notamment de folates), ainsi que de minéraux (fer, zinc, calcium ...). Outre les inhibiteurs de protéases, beaucoup de graines de légumineuses (surtout les variétés tropicales) contiennent des composés toxiques tels que les lectines et l'acide phytique. Il a été montré sur des modèles animaux que certaines lectines (hémagglutinine) à des niveaux élevés peuvent provoquer des diarrhées et vomissements, ainsi qu'une irritation de la muqueuse intestinale. Ces lectines sont en grande partie désactivées par la cuisson ce qui réduit considérablement le risque de toxicité pour l'homme.

**Tableau 16 :** Composition nutritionnelle de quelques graines de légumineuses, par rapport à des aliments de référence (féculent, viande, lait).

pour		Energie	Protéines	Lipides	Glucides	Fibres	Fer	Zinc	Calcium	
100 g		kcal	g	g	g	g	mg	mg	mg	
<b>Haricot blanc</b>	sec	333	23,4	0,9	60,3	15,2	10,40	3,67	240	
	cuit	139	9,7	0,4	25,1	6,3	3,70	1,38	90	
<b>Lentilles</b>	sec	352	24,6	1,1	63,4	10,7	6,51	3,27	35	
	cuit	116	9,0	0,4	20,1	7,9	3,33	1,27	19	
<b>Pois chiche</b>	sec	378	20,5	6,0	63,0	12,2	4,31	2,76	57	
	cuit	164	8,9	2,6	27,4	7,6	2,89	1,53	49	
<b>Pois cassé</b>	sec	352	23,8	1,2	63,7	15,5	4,82	3,55	37	
	cuit	118	8,3	0,4	21,1	8,3	1,29	1,00	14	
<b>Fêve</b>	sec	341	26,1	1,5	58,3	25	6,70	3,14	103	
	cuit	110	7,6	0,4	19,7	5,4	1,50	1,01	36	
<b>Cornille</b>	sec	336	23,5	1,3	60,0	10,6	8,27	3,37	110	
	cuit	116	7,7	0,5	20,8	6,5	2,51	1,29	24	
<b>Lupin</b>	sec	371	36,2	9,7	40,4	18,9	4,36	4,75	176	
	cuit	119	15,6	2,9	9,9	2,8	1,20	1,38	51	
<b>Soja</b>	sec	446	36,5	19,9	30,2	9,3	15,70	4,89	277	
	Tofu	61	7,2	3,7	1,2	0,2	1,11	0,64	111	
<b>Riz</b>	cuit	130	2,7	0,3	28,2	0,4	1,20	0,49	10	
<b>Pâtes</b>	cuit	158	5,8	0,9	30,9	1,8	0,50	0,51	7	
<b>Viande (bifteck)</b>	cuit	142	26,4	4,1	-	-	2,90	5,60	-	
<b>Lait entier, 1 verre</b>		25 cl	157	8,1	8,4	12,3	-	0,07	0,95	292

L'acide phytique présent essentiellement dans l'enveloppe des graines bloque la libération des minéraux et constitue ainsi un obstacle important à leur absorption. Le trempage et la fermentation permettent de réduire sensiblement la teneur en acide phytique, mais le traitement le plus efficace semble la germination. Pour chacun de ces facteurs antinutritionnels, l'effet est proportionnel à la dose et il est important de noter que leur teneur varie non seulement en fonction de la légumineuse considérée mais aussi du cultivar. Comme leurs effets négatifs sont en plus modulés par les procédés de préparation des graines, les effets négatifs des facteurs antinutritionnels seront surtout observables lors de la consommation monotone d'une graine non cuite particulièrement riche en ces composés.



Il en découle deux conseils : utiliser la préparation culinaire adaptée et varier les plaisirs ! Sur le plan de l'équilibre nutritionnel, il faut essentiellement retenir que les légumineuses permettent d'apporter une quantité significative de fibres tout en limitant la consommation de protéines animales.

**Tableau 17** : Composition en lysine, acides aminés soufrés et tryptophane des graines de légumineuses, par rapport à des aliments de référence (féculent, viande, lait).

Pour 100g		Lysine	Methionine + cystéine	Tryptophane
<b>Haricot blanc</b>	sec	1,60	0,61	0,28
	cuit	0,67	0,25	0,12
<b>Lentilles</b>	sec	1,72	0,53	0,22
	cuit	0,63	0,20	0,08
<b>Pois chiche</b>	sec	1,38	0,55	0,20
	cuit	0,59	0,24	0,09
<b>Pois cassé</b>	sec	1,77	0,62	0,28
	cuit	0,60	0,21	0,09
<b>Fêve</b>	sec	1,67	0,55	0,25
	cuit	0,49	0,16	0,07
<b>Cornille</b>	sec	1,59	0,60	0,29
	cuit	0,52	0,20	0,10
<b>Lupin</b>	sec	1,93	0,70	0,29
	cuit	0,83	0,30	0,13
<b>Soja</b>	sec	2,71	1,20	0,59
	Tofu	0,43	0,18	0,10
<b>Riz</b>	cuit	0,10	0,12	0,03
<b>Pâtes</b>	cuit	0,13	0,18	0,08
<b>Viande (bifteck)</b>	cuit	2,2	1,82	0,26
<b>Lait entier, 1 verre</b>	25cl	0,68	0,26	0,10

### *Fruits et légumes*

Les fruits et légumes apportent dans notre alimentation quotidienne des fibres, des vitamines, des minéraux, dont les apports nutritionnels conseillés ont été établis. Ils renferment aussi une grande variété de composés, dépourvus de valeur nutritionnelle stricto sensu. Ces composés appartiennent à différentes familles : les polyphénols, les caroténoïdes (en dehors des caroténoïdes provitaminiques A) comme le lycopène ou la lutéine, les composés soufrés (glucosinolates et sulfures d'allyle) et les

phytostérols. Aujourd'hui, il n'existe pas d'ANC pour ces micro-constituants, même si beaucoup de travaux établissent qu'ils pourraient avoir également un effet préventif sur notre santé.

Les fruits apportent environ 28% de l'apport total en polyphénols lequel est estimé à environ 1g par jour soit 10 fois l'apport en vitamine C et 100 fois celui en vitamine E. Une compilation d'études prospectives met en avant un effet protecteur probable d'un plus grand apport en flavonoïdes vis-à-vis des maladies cardio-vasculaires (confirmé dans le rapport FAO, 2006). Mais, il n'est apparu aucune association entre apport en flavonoïdes et protection des cancers. A l'heure actuelle, il n'est pas possible d'établir des apports journaliers recommandés pour les polyphénols. La protection des polyphénols vis-à-vis des maladies cardiovasculaires est apparue essentiellement reliée à leurs effets antioxydants (en particulier l'effet protecteur sur la peroxydation des lipoprotéines). Il a été montré dans de nombreuses études que les polyphénols neutralisent les radicaux libres, entités extrêmement réactives et délétères vis-à-vis de nos biomolécules (protéines, lipides, ADN).

En revanche, les polyphénols peuvent moduler l'expression ou l'activité de molécules impliquées dans le processus athérosclérotique, et par exemple diminuer la production de facteurs pro-inflammatoires, et stimuler celle de facteurs anti-inflammatoires. Ils sont aussi capables de diminuer d'autres facteurs de risque des maladies cardio-vasculaires, comme l'hyperlipémie. Un effet antiradicalaire des polyphénols reste toutefois possible au niveau du tube digestif, où ils sont largement majoritaires lors de la digestion. Ils pourraient alors agir en limitant les effets délétères des substances pro-oxydantes présentes dans le repas et protéger les autres antioxydants alimentaires de la dégradation. Les polyphénols auraient certainement un rôle de synergie ou de complémentarité avec les autres antioxydants (vitamines C et E, caroténoïdes) dans la prévention du risque cardiovasculaire.

Les brocolis, les choux, les choux- fleurs, les choux-frisés ou de Bruxelles sont des sources spécifiques de glucosinolates dans notre alimentation. Les glucosinolates, une fois ingérés, sont transformés chez l'homme en isothiocyanates, substances potentiellement anticarcinogènes. Les isothiocyanates sont des substrats et inducteurs d'enzymes de la phase II comme la glutathion S-transférase (GST) impliquée dans la détoxification des carcinogènes.

La consommation de phytostérols (ou stérols végétaux), qui sont des molécules liposolubles avec une structure semblable à celle du cholestérol, permet de réduire le cholestérol plasmatique. Le résultat d'une méta-analyse a montré que la consommation journalière de 2g/j de phytostérols réduisait de 10% le LDL-C. Cet effet hypocholestérolémiant semble passer par la réduction de l'incorporation du cholestérol (alimentaire et biliaire) dans les micelles mixtes via une inhibition compétitive des phytostérols.

## *Les algues*

La quantité de macro-algues transformées annuellement dans le monde est de plus de 9 millions de tonnes (poids frais). Premier débouché mondial en valeur et volume, les applications alimentaires directes (algue légume) concernent 75 % de cette production. L'algue est un aliment traditionnel qui présente un intérêt nutritionnel connu et exploité depuis de nombreuses années par les populations du Sud-Est asiatique. La valeur nutritionnelle des algues peut s'expliquer en grande partie par la présence conjointe de trois grandes catégories de composants (fibres, minéraux et protéines), mais également par la présence de métabolites présentant des propriétés antioxydantes et antiradicalaires tels que caroténoïdes, polyphénols, vitamines ou acides gras polyinsaturés.

Les algues puisent dans la mer une richesse incomparable d'éléments minéraux. La fraction minérale peut représenter jusqu'à 36 % de la masse sèche. La diversité des éléments représentés est énorme : calcium, sodium, magnésium, potassium, phosphore, iode, fer, zinc, etc. La teneur en protéines des algues marines est variable. Une microalgue comme la spiruline en contient jusqu'à 70 % de la matière sèche. Chez les macro-algues, certaines espèces d'algues rouges possèdent une fraction protéique (30–40 % de la matière sèche) comparable, du point de vue quantitatif, à celle des légumineuses.

Parmi les protéines algales, il faut citer la présence chez les algues rouges et bleues de molécules particulières : les phycobiliprotéines, qui sont les principaux pigments de ces algues. Les phycobiliprotéines (phycocyanine de spiruline et phycoerythrine des algues rouges) possèdent par ailleurs des propriétés antioxydantes qui pourraient être mises à profit dans la prévention ou le traitement de maladies dégénératives : certaines formes de cancer, maladies cardiovasculaires ou ophtalmiques liées au stress oxydatif. Les algues rouges contiennent des taux élevés d'acides gras polyinsaturés à 20 carbones : l'acide gras oméga 3 EPA ( $\omega 3 - C_{20} : 5$ ) constitue 50 % des acides gras polyinsaturés chez *Porphyra sp.* et *Palmaria palmata*.

La plupart des algues marines contiennent des polyphénols algaux aussi appelés phlorotannins. Les phlorotannins constituent un groupe très hétérogène de molécules fournissant ainsi une grande variété d'activités biologiques potentielles. Les teneurs les plus élevées sont retrouvées dans les algues brunes qui en contiennent entre 5 et 15 % du poids sec.

### **3. Systèmes alimentaires d'origines animales**

#### **3.1. Muscles**

Le Codex Alimentarius définit la viande de la manière suivante : « Toutes les parties d'un animal destinées, ou jugées saines et aptes, à la consommation humaine ». Elle se compose d'eau, de

protéines et d'acides aminés, de sels minéraux, de graisses et d'acides gras, de vitamines et d'autres composants bioactifs, et de petites quantités d'hydrates de carbone (Tableau 18).

**Tableau 18** : Composition nutritionnelle de diverses viandes et d'autres aliments pour 100g.

Produit	Eau	Prot.	Grais.	Cendres	kJ*
Bœuf (maigre)	75.0	22.3	1.8	1.2	485
Bœuf (carcasse)	54.7	16.5	28.0	0.8	1351
Porc (maigre)	75.1	22.8	1.2	1.0	469
Porc (carcasse)	41.1	11.2	47.0	0.6	1975
Veau (maigre)	76.4	21.3	0.8	1.2	410
Poulet	75.0	22.8	0.9	1.2	439
Gibier (cerf)	75.7	21.4	1.3	1.2	431
Graisse de bœuf (sous-cutanée)	4.0	1.5	94.0	0.1	3573
Graisse de porc (lard dorsal)	7.7	2.9	88.7	0.7	3397
Lait (pasteurisé)	87.6	3.2	3.5		264
Œuf (dur)	74.6	12.1	11.2		661
Pain (seigle)	38.5	6.4	1.0		1000
Pommes de terre (cuites)	78.0	1.9	0.1		301

Alors que la composition chimique des muscles est assez constante (environ 75 % d'eau, 19 à 25 % de protéines, 1 à 6 % de lipides, 1 à 2 % de minéraux et 1 à 2 % de glucides), celle des viandes est très variable, notamment en ce qui concerne leur teneur en lipides. Ainsi la proportion de lipides varie de 2,5 % (escalope de veau) à 17,3 % (côtelettes d'agneaux grillées) avec des valeurs intermédiaires de 3,6 % (rumsteck grillé ou jarret bouilli en pot au feu) et de 11,8 % (entrecôte grillée) (Tableau 19). Du point de vue nutritionnel, la viande doit son importance à la qualité élevée de ses protéines, qui contiennent tous les acides aminés essentiels, ainsi qu'à ses sels minéraux et vitamines fortement biodisponibles. Elle est riche en vitamine B12 et en fer, éléments qui ne sont pas directement disponibles dans les régimes végétariens.

En outre, la viande bovine se caractérise aussi par un rapport élevé protéines/lipides qui peut atteindre, selon le morceau cuit, des valeurs comprises entre 12,0 et 2. Ces valeurs sont supérieures à celles d'autres aliments pourtant riches en protéines, tels que les œufs (1,20), les fromages (cantal : 0,

75) et certains poissons gras (maquereau : 0,80). Le rapport AGPI sur AG saturés de la viande de bovin ou d'agneau est de 0,11 à 0,15, c'est-à-dire inférieur à la valeur recommandée en nutrition humaine (0,45). Bien que les viandes contiennent des quantités significatives de cholestérol (de 50 à 100 mg/100 g), elles en contiennent moins que les abats et les œufs. De plus, il est important de souligner que chez l'Homme, plus de la moitié du cholestérol est synthétisée dans le foie et l'intestin.

**Tableau 19** : Valeurs nutritionnelles (pour 100 g de viande cuite) de divers types de viandes de ruminants.

	Boeuf			Agneau	
	Rumsteck grillé	Faux filet rôti	Entrecôte grillée	Gigot rôti	Côtes premières grillées
Energie (kJ)	485	625	849	727	1042
Protéines (g)	21	23	24	23	23
Lipides (g)	3,6	6,4	11,8	8,9	17,3
Cholestérol (mg)	35	33	45	70	90
Acides gras: composition (%)					
- saturés	44	49	50	50	48
- mono-insaturés	40	44	41	38	41
- poly-insaturés	9	3	5	10	10
Fer (mg)	2,9	1,9	2,6	2,0	5,3
Zinc (mg)	4,2	3,3	5,4	2,9	2,5
Vitamines					
B1 (mg)	0,10	0,04	0,09	0,13	0,10
PP (mg)	7,30	5,90	6,20	7,20	7,60
B5 (mg)	1,47	0,34	1,37	0,83	0,70
B6 (mg)	0,56	0,29	0,42	0,34	0,36
B12 (mg)	1,50	0,54	1,40	1,60	1,70
E (mg)	0,44	0,2	0,58	0,18	0,11

La viande des ruminants, des bovins en particulier, est également une source de fer héminique, 3 et 4 fois plus importante respectivement, que les viandes de porc et de poulet, le fer héminique étant 5 à 6 fois mieux absorbé que le fer non héminique des végétaux. Le zinc est également abondant dans la viande bovine. Enfin, la viande des ruminants est une source importante de vitamines du groupe B (B1, B2, B6, B12 et niacine), en particulier de vitamines B6 et B12.

### 3.2. Œufs

Produit de base d'excellente valeur alimentaire pour l'ensemble des populations, l'œuf est depuis toujours, un des aliments d'origine animale les plus utilisés dans le monde (consommation en

augmentation de 3 % par an depuis 10 ans). Sa composition, remarquablement stable et indépendante des conditions d'élevage et d'alimentation pour ses constituants majeurs peut être enrichie en nutriments, actuellement très recherchés en nutrition humaine tels que acides gras essentiels, antioxydants et vitamines.

L'œuf est constitué de 60 % de blanc et de 30 % de jaune, contenus dans une coquille qui représente 10 % du poids total (Tableau 20). L'œuf de poule sans coquille contient 74,4 % d'eau et deux séries de nutriments majeurs : des protéines (12,3 % ; 6,7 g/œuf, soit 30 % du besoin quotidien de l'homme/100 g d'œuf) et une quantité équivalente de lipides (11,9 %). Il renferme toutes les vitamines (sauf la vitamine C), de très nombreux minéraux et oligoéléments (Tableau 21).

L'œuf est pauvre en énergie (85 kcal soit 6 % seulement du besoin quotidien de l'homme/100 g d'œuf). Le blanc est une solution aqueuse de protéines et de sels minéraux mais dépourvue de lipides alors que le jaune contient 78 % des calories et tous les lipides. Les vitamines, qu'elles soient liposolubles ou hydrosolubles, sont majoritairement présentes dans le jaune, exception faite de la riboflavine et la niacine (vitamines B2 et B3) que l'on retrouve principalement dans le blanc d'œuf.

Les protéines sont réparties équitablement entre le blanc et le jaune d'œuf. Les protéines du blanc sont pour la plupart des glycoprotéines ; l'ovotransferrine et le lysozyme. Tous les lipides de l'œuf (6 g par œuf) sont contenus dans le jaune. Ils sont associés aux protéines dans la proportion de 2/1. Les lipides représentent de 33 à 35 % du poids du jaune frais et 65 % de sa matière sèche. Les lipides de l'œuf sont composés pour les deux tiers de triglycérides (65 %) mais incluent des phospholipides (31 %) et du cholestérol (4 %). La digestibilité des triglycérides est excellente (98 %), celle des phospholipides très satisfaisante (90 %). Les acides gras polyinsaturé (AGPI) alimentaires sont oxydables et peuvent conduire à la formation de peroxydes. L'œuf, bien que riche en AGPI, est relativement moins sensible que d'autres produits à l'oxydation, du fait de sa forte teneur en phospholipides qui participent à la régénération des antioxydants primaires en fournissant des radicaux hydrogènes et renforcent ainsi l'action bénéfique du tocophérol. La phosvitine du jaune possède également un effet antioxydant du fait de son pouvoir chélateur du fer.

**Tableau 20** : Composition moyenne de l'œuf (par 100 g ; œuf sans coquille).

Nutriments	Blanc	Jaune	Œuf <sup>(1)</sup>	ANC <sup>(2)</sup>	100 g œuf % ANC
Proportion part comestible <sup>(3)</sup>	60	30,7	90,7		
Eau (g)	88,6	49	74,4		
Calories (kcal)	47	364	154	2700	6
Protéines (g)	10,6	16,1	12,3	42	29
Glucides (g)	0,8	0,5	0,7		
Cendres (g)	0,5	1,6	0,9		
Lipides (g)	0,1	34,5	11,9		
Triglycérides (g)		22,9	7,7		
Phospholipides (g)		10,0	3,4		
Acides gras saturés (g)		13,0	4,4	19,5	22,5
16:0 acide palmitique		7,3	2,5		
18:0 acide stéarique		2,5	0,86		
Acides gras insaturés (g)		20,7	7,0	49,5	14
16:1-acide palmitoléique		1,1	0,4		
18:1-acide oléique		12	4,1		
18:2-acide linoléique (n-6)		3,6	1,25	10	12,5
18:3-acide linoléique (n-3)		0,12	0,04	2	2
20:4-acide arachidonique (n-6, AA)		0,6	0,2		
20:5-acide eicosapentaénoïque (n-3)		0	0		
22:6-acide docosahéxaénoïque (n-3)		0,4	0,15	0,12	125
Cholestérol (g)	0	1,2	0,42		
Lécithine (Phosphatidylcholine) (g)		7,2	2,30		
Céphaline (g) (phosphatidyléthanolamine)		1,4	0,46		
Acides aminés indispensables, mg					
Histidine				mg/j	
Isoleucine	240	410	290	840	34
Leucine	560	870	660	1400	47
Lysine	880	1390	1040	2400	44
Méthionine+cystine	660	1170	820	2450	33
Phénylalanine+tyrosine	670	660	640	1400	45
Thréonine	1020	1420	1150	2240	51
Tryptophane	470	850	590	1120	52
Valine	170	240	190	280	68

(1) Œuf sans coquille. (2) ANC, recommandations journalières pour l'homme adulte, mâle de 70 kg. (3) Par rapport à l'œuf entier (avec coquille).

**Tableau 21 :** Composition moyenne de l'œuf (100 g produit frais) en vitamines et minéraux et couverture du besoin quotidien de l'homme adulte.

Nutriments	Blanc/ 100 g	Jaune/ 100 g	Œuf entier /100 g frais	ANC <sup>(1)</sup>	100 g œuf % ANC
Minéraux (mg/100 g)	500	1600	700		
Sodium	155	50	120	7000	2
Chlore	175	162	172	5000	3
Potassium	140	100	125	600	21
Calcium	8	133	50	900	5,5
Phosphore	18	530	193	750	26
Fer	0,1	4,8	1,7	9	19
Magnésium	10	15	12	350	3
Soufre	163	165	164		18
Zinc	0,12	3,9	1,3	9-14	11
Cuivre	0,02	0,14	0,06	2	3
Manganèse	0,007	0,11	0,04	1-2,5	2
Iode	0,003	0,14	0,05	0,15	33
Vitamines (µg/100g)					
	0	0	0	110000	0
Acide Ascorbique					
A, Rétinol Equivalent	0	450	150	800	19
D	0	4,5	1,5	5	30
E	0	3600	1300	12000	11
Thiamine B1	10	250	91	1300	7
Riboflavine B2	430	480	447	1600	28
Niacine B3	90	60	79	14000	0,6
Biotine B8	7	60	25	50	50
Vitamine B6	10	370	138	1800	8
Vitamine B12	0,1	2,8	1	2,4	41
Acide folique B9	12	140	60	330	18
Acide pantothénique B5	250	4500	1700	5000	34

(1) ANC, recommandations journalières pour l'homme adulte, mâle de 70 kg.

L'œuf ne contient pas de fibres glucidiques. Sa teneur en sucres simples est extrêmement faible (1 % de l'œuf) répartis entre le blanc et le jaune. Le glucose est la forme libre dominante (98 % des 0,5 % de sucres libres). L'œuf contient de nombreux glyco-conjugués notamment des glycoprotéines (ovomucoïde, ovalbumine, ovotransferrine, ovomucine et avidine dans le blanc ; phosvitine et riboflavine dans le jaune). Les glycanes sont constitués de monosaccharides, d'osamines et d'un acide sialique, l'acide N-acétylneuraminique. Ce dernier présente une



concentration élevée (2,4 %) dans les chalazes – ligaments suspenseurs du jaune dans le blanc et dans la membrane vitelline (1,8 %) ; il est aussi présent dans le jaune (0,19 % de la matière sèche).

Les xanthophylles (caroténoïdes présentant un groupement oxygène) ont un effet colorant. S'ils possèdent une activité provitamine A, ces caroténoïdes perdent leur pouvoir pigmentant lors de leur conversion en vitamine A. Le  $\beta$ -carotène possède un pouvoir anti-oxydant qui pourrait expliquer leur effet protecteur vis-à-vis du cancer ou de maladies cardiovasculaires. L'œuf est par contre relativement riche en lutéine (1 mg / 100 g d'œuf) au même titre que des aliments comme l'épinard ou le chou. La lutéine réduirait le risque de cataracte et dégénérescence maculaire chez les personnes âgées. De part ses propriétés anti-oxydantes, elle pourrait également contribuer à une diminution du risque d'artériosclérose.

### 3.3. Lait

Le lait contient des nutriments essentiels et est une source importante d'énergie alimentaire, de protéines de haute qualité et de matières grasses. Le lait peut apporter une contribution significative aux besoins nutritionnels recommandés en calcium, magnésium, sélénium, riboflavine, vitamine B12 et acide pantothénique. Le lait et les produits laitiers sont des aliments nutritifs et leur consommation permet de diversifier les régimes à base de plantes. Le lait d'origine animal peut jouer un rôle important dans l'alimentation des enfants dans les populations ne bénéficiant que d'un très faible apport en lipides et ayant un accès limité aux autres aliments d'origine animale.

L'espèce de l'animal laitier, la race, l'âge et l'alimentation, ainsi que le stade de lactation, la parité (nombre de parturitions), le système d'exploitation, l'environnement physique et la saison influencent la couleur, la saveur et la composition du lait et permettent de produire une variété de produits laitiers :

- **Le lait de vache** : les matières grasses constituent environ 3 à 4 pour cent des solides du lait de vache, les protéines environ 3,5 pour cent et le lactose 5 pour cent, mais la composition chimique brute du lait de vache varie en fonction de la race. Par exemple, la teneur en matière grasse est généralement plus élevée chez les bovins *Bos indicus* que chez *B. taurus*. La teneur en matière grasse du lait de bovin *B. indicus* peut atteindre 5,5 pour cent.
- **Le lait de chamelle** a une composition semblable à celle du lait de vache, mais est légèrement plus salé. Le lait de chamelle peut être trois fois plus riche en vitamine C que le lait de vache et représente une source vitale de cette vitamine pour les personnes vivant dans les zones arides et semi-arides, qui ne peuvent souvent pas obtenir de vitamine C par la consommation de fruits et de légumes. Le lait de chamelle est également riche en acides gras insaturés et en

vitamine B. Le lait du chameau de Bactriane a un pourcentage plus élevé de matières grasses que le lait de dromadaire, mais les niveaux de protéines et de lactose sont similaires. En général, le lait de chamelle est consommé cru ou fermenté.

- **Le lait de brebis** contient plus de matières grasses et de protéines que les laits de vache et de chèvre ; seuls les laits de bufflonne et de yak contiennent plus de matières grasses. Le lait de brebis possède aussi généralement une teneur plus élevée en lactose que les laits de vache, de bufflonne et de chèvre. Grâce à sa haute teneur en protéines et à l'ensemble de ses constituants solides, le lait de brebis est particulièrement approprié pour la fabrication de fromage et de yaourt. Le lait de brebis tient un rôle important dans la région méditerranéenne, où la plus grande partie de la production est transformée en fromages comme le pecorino, le caciocavallo et la feta.
- **Le lait de chèvre** a une composition semblable au lait de vache. Dans les pays méditerranéens et en Amérique latine, le lait de chèvre est généralement transformé en fromage ; en Afrique et en Asie du Sud, il est généralement consommé cru ou acidifié.
- **Le lait de yak** : Le lait de yak a un goût sucré et une odeur douceâtre et parfumée. Le lait de yak contient entre 15 et 18 pour cent de matières solides, 5,5 à 9 pour cent de matières grasses et 4 à 5,9 pour cent de protéines. Il a donc des teneurs en matières solides, lipides et protéines supérieures à celles du lait de chèvre et de vache, et ressemble au lait de bufflonne. Le lait cru est principalement utilisé par les bergers et leurs familles pour le rajouter dans leur thé. Le lait de yak peut être transformé en une variété de produits laitiers, y compris le beurre, le fromage et les produits laitiers fermentés.
- **Le lait équin** : Les laits de jument et d'ânesse ont des compositions très similaires. Le lait équin, comme le lait humain, est relativement faible en protéines (caséines en particulier) et en cendres et riche en lactose. Comparée à celui des autres espèces laitières, le lait équin contient de faibles teneurs en lipides et en protéines. Le lait équin est la plupart du temps consommé sous forme fermentée et il n'est pas adapté à la fabrication de fromage.

Les protéines laitières (caséines  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$  et  $\kappa$ ,  $\beta$ -lactoglobuline,  $\alpha$ -lactalbumine, lactoferrine, lactoperoxydase, immunoglobulines, etc.) et peptides provenant de ces protéines présentent des activités biologiques variées (Tableau 22). La matière grasse laitière présente des intérêts nutritionnels certains. Considérée comme source d'énergie, elle est constituée à 98 % de triglycérides. Les acides gras contenus dans les triglycérides sont à 65 % saturés et 35 % insaturés. Il faut également savoir que 15 % des acides gras sont à courte et moyenne chaînes et que 3 à 5 % sont des acides gras poly-insaturés essentiels. Par ailleurs, cette fraction lipidique contient des molécules importantes pour notre santé comme le cholestérol, les vitamines liposolubles et des phospholipides dont l'intérêt

semble grandissant. La fraction glucidique du lait est essentiellement représentée par le lactose. Le lactose est un disaccharide constitué de glucose et de galactose, il y en a environ 50 g par litre de lait de vache. Au niveau technologique, sa présence dans le lait est indispensable à la fabrication de produits laitiers fermentés (yaourts, fromages).

**Tableau 22** : Classification des protéines.

NOMS	% des protéines	Nombre d'AA
CASEINES :	75-85	
Caséine $\alpha_{s1}$	39-46	199
Caséine $\alpha_{s2}$	8-11	207
Caséine $\beta$	25-35	209
Caséine $\kappa$	8-15	169
Caséine $\gamma$	3-7	
PROTEINES DU LACTOSERUM	15-22	
$\beta$ -Lactoglobuline	7-12	162
$\alpha$ -Lactalbumine	2-5	123
Sérum-albumine	0.7-1.3	582
Immunoglobulines (G1, G2, A, M)	1.9-3.3	
Protéoses-peptones	2-4	

Les minéraux du lait représentent une petite fraction (8-9 g / l) du lait comparativement aux autres fractions ; elle contient calcium, magnésium, sodium et potassium pour les principaux cations et chlorure, phosphate inorganique et citrate pour les principaux anions (Tableau 23).

**Tableau 23** : Concentrations des minéraux du lait.

Minéraux	Concentration (mg / l)
Calcium	1200
Magnésium	120
Sodium	500
Potassium	1400
Phosphate	900
Citrate	1500
Chlorure	1100

Le lait et ses dérivés sont des sources notables en vitamine A, B<sub>12</sub> et B<sub>2</sub> ; dans une moindre mesure en vitamine B<sub>1</sub>, B<sub>6</sub> et PP ; par contre ils ne contiennent que peu de vitamines E, acide folique et biotine.

Le tableau 24 donne les différentes teneurs en vitamines que l'on trouve dans le lait. Il est à noter que d'une source à une autre, les valeurs peuvent être différentes, ce qui est, une conséquence de l'instabilité des vitamines à doser et des techniques analytiques utilisées.

**Tableau 24 :** Composition vitaminique moyenne du lait cru.

<b>Vitamines</b>	<b>Teneur en µg/l (d'après Jensen, 1995)</b>	<b>Teneur en mg/l (d'après Adrian, 1987)</b>
B1, thiamine	388	400
B2, riboflavine	914	1700
B6, pyridoxine	554	600
B12, cobalamine	4	6
PP, niacine	1300	900
acide folique	60	2
acide pantothénique	3251	3200
biotine	47	40
C	30 000	20 000
A, rétinol		500
carotènes	310	30
D	0,4	1
E, tocophérols	400	1500
K	3	100

#### 4. Système alimentaire non conventionnelle

Les aliments non conventionnels peuvent être produits à partir de produits chimiques tels que les glucides et les produits chimiques organiques industriels par des processus tels que la synthèse microbiologique, enzymatique ou chimique ; ou à partir de produits naturels existants contenant des glucides, des protéines et des graisses par modification physique, chimique, microbiologique ou enzymatique.

Les aliments non conventionnels doivent avoir une valeur nutritionnelle pour les humains ou les animaux, et une valeur fonctionnelle dans les aliments qui garantissent la qualité et l'acceptabilité sociale et culturelle. Ils doivent également répondre aux exigences des organismes de réglementation

en matière de sécurité pour la consommation humaine, y compris l'absence de substances toxiques, mutagènes et cancérigènes et de micro-organismes pathogènes (**Litchfield, 2000**).

#### **4.1.Protéines**

Des sources alternatives de protéines ont été utilisées dans une mesure limitée par certaines sections de la population, mais son utilisation universelle et son acceptabilité par le reste de l'humanité restent un défi. Les sources alternatives de protéines communément connues sont les organismes unicellulaires (levure), les organismes aquatiques (krill, algues) et les insectes, qui ont une composition en acides aminés similaire à celle des protéines animales traditionnelles consommées comme régime alimentaire avec des protéines de 77,9 à 98,9 % comme digestible. Les sources alternatives de protéines dans la production alimentaire présentent des avantages sociaux, économiques, sanitaires et environnementaux.

D'un point de vue nutritionnel, les micro-organismes peuvent être une source précieuse de protéines à haute valeur biologique. Selon le type, la souche et les conditions de croissance microbienne et la composition du milieu, la teneur en protéines de la masse sèche de la biomasse unicellulaire peut varier entre 40 et 80 %. La plupart des protéines contiennent des bactéries (50 à 80 %), puis des algues et des levures (30 à 75 %) et moins de moisissures (20 à 45 %). Les protéines unicellulaires sont une riche source de lysine ; cependant, ils sont déficients en certains acides aminés essentiels, principalement sulfuriques (méthionine et cystéine).

Les protéines de cellules séchées de micro-organismes tels que les bactéries (*Cellulomonas*, *Alcaligenes*), les levures (*Candida*, *Saccharomyces*), les algues (*Chlorella*, *Spirulina*, *Scenedesmus*) et les moisissures (*Trichoderma*, *Fusarium*, *Rhizopus*) génère de nombreuses opportunités dans la technologie de production alimentaire. La diversité des méthodes, des matières premières et des micro-organismes utilisés, l'efficacité élevée de conversion du substrat et l'efficacité associée à la croissance rapide des micro-organismes et à l'absence de dépendance aux facteurs saisonniers et climatiques attachent une grande importance à ces micro-organismes d'un point de vue nutritionnel en tant que source de protéines de haute valeur biologique. La valeur nutritionnelle de ces protéines est supérieure à celles d'origine végétale, et lorsqu'elles sont supplémentées en méthionine, elles deviennent comparables aux protéines d'origine animale. Il a également été prouvé que les protéines obtenues à partir de micro-organismes sont une riche source de vitamines B et de minéraux, tels que : zinc, phosphore, magnésium, sélénium, chrome. De plus, certaines espèces de levures, par ex. *Saccharomyces cerevisiae*, ont un effet probiotique dans le corps humain. Le composant acide nucléique (2 à 18 % de matière sèche) est également un composant de la biomasse, ce qui représente

un danger potentiel pour le corps humain, car il peut entraîner l'accumulation de cristaux d'acide urique dans les reins ou les articulations, entraînant la goutte.

Les algues ne concurrencent pas les cultures vivrières traditionnelles pour l'espace et les ressources, ce sont des algues et des microalgues, riches en nutriments et une source durable de protéines. Les macroalgues (algues) et les microalgues sont des exemples de cultures sous-exploitées. Les macroalgues sont un groupe diversifié d'espèces en tant qu'organismes producteurs d'oxygène, photosynthétiques, unicellulaires ou multicellulaires, à l'exclusion des plantes terrestres embryophytes et des lichens. Exploités pour la consommation humaine sont *Undaria pinnatifida* (wakame), *Hizikia fusiformis* (hijiki) et *Laminaria japonica* (kombu).

Les algues peuvent être consommées directement sous forme d'algues entières, tandis que les microalgues sont principalement utilisées pour l'extraction de compléments alimentaires. Certaines espèces d'algues et de microalgues contiennent des niveaux de protéines similaires à ceux des sources de protéines traditionnelles, telles que la viande, les œufs, le soja et le lait. Même si les microalgues sont des organismes microscopiques unicellulaires, elles sont toujours considérées comme une source alternative de protéines viable. Les algues sont une source précieuse de protéines, d'acides aminés, de minéraux et de vitamines, d'une teneur négligeable en graisses et en cholestérol, elles accompagnent donc de nombreux bienfaits pour la santé lorsqu'elles sont consommées, telles que l'abaissement de la tension artérielle et la prévention des accidents vasculaires cérébraux. En termes de nutrition, les algues marines sont d'excellentes alternatives aux protéines végétales conventionnelles.

Krill, ou espèces de crustacés vivant dans les océans autour le monde, est un maillon important de la chaîne alimentaire, en tant qu'aliment pour les animaux et les oiseaux marins, et dans une bien moindre mesure pour l'homme. Le krill en apparence ressemble à la crevette, il atteint une masse de 0,01 à 2,0 g et une longueur de 0,8 à 6,0 cm. Les espèces de krill les mieux étudiées pour la consommation humaine sont le krill antarctique (*Euphausia superba*) et le Krill Pacifique (*Euphausia pacifica*). Cette espèce est une riche source de protéines à pleine valeur à hauteur de 60 à 65 % en matière sèche.

Les concentrés de protéines de poisson (FPC) et les isolats (FPI) sont produits pour l'alimentation humaine à partir d'espèces comestibles entières de poisson à l'aide de méthodes de traitement hygiéniques ; la farine de poisson et les solubles de poisson sont produits pour l'alimentation animale. Les matières premières des isolats des protéines des poissons comprennent le merlu entier, le poisson ressemblant au merlu et le hareng des genres *Clupea*, ainsi que le menhaden et l'anchois de l'espèce *Engraulis mordax* sans enlèvement de la tête, des nageoires, de la queue ou du contenu intestinal. Les réglementations relatives à l'administration des aliments et des produits

pharmaceutiques précisent également que les concentrés de protéines de poisson et isolats des protéines des poissons contiennent respectivement des teneurs minimales en protéines de 75 et 90 %, une teneur maximale en matières grasses de 0,5 % et une teneur en humidité maximale de 10 % en poids. Les profils d'acides aminés des concentrés de protéines de poisson sont excellents et se comparent favorablement à ceux de l'œuf entier, à l'exception du tryptophane et de la lysine.

## 4.2.Lipides

Les diverses graines oléagineuses non conventionnelles, disponibles dans différentes parties du pays, sont celles qui portent des plantes annuelles, des herbes ou des légumes, que l'on trouve dans les régions tropicales et subtropicales. Le *Moringa oleifera* (Arbre de Vie, huile de Ben ou huile de Behen), originaire de la région sub-himalayenne, présente de nombreux composants nutritifs ( $\beta$ -carotène, protéines, antioxydants, minéraux) qui ont des impacts potentiels sur la santé humaine. Les grains de *M. oleifera* contiennent  $\approx 40$  % d'huile avec plus de 70 % d'acide oléique, ce qui offre une résistance à la dégradation oxydative après raffinage. La teneur en AGMI de l'huile de Moringa et de l'huile d'olive est la même, elle peut donc être utilisée comme substitut de l'huile d'olive. La faible teneur en AGPI peut également être un avantage pour l'huile de *M. oleifera* car cela la rend plus résistante et stable à l'oxygène. L'huile de graines de *M. oleifera* peut remplacer l'huile d'olive dans les graisses alimentaires en raison de sa teneur en acides gras monoinsaturés similaire à celle de l'huile d'olive. Les graines de Moringa ont des effets sur la santé humaine comme réduire le taux de mortalité, la mortalité cardiovasculaire, les événements cardiovasculaires et les accidents vasculaires cérébraux. Il agit comme un remède contre les maladies comme les ulcères, les douleurs articulaires, les maux d'estomac, etc. en médecine traditionnelle.

L'huile de graines de casse (principalement trouvé en Afrique et en Amérique) contient de l'acide lignocérique, palmitique, oléique, stéarique, linoléique qui est responsable de l'activité hypolipidémique. Cardinal Climber (*Ipomoea quamoclit*) originaire d'Inde contient de l'acide oléique, de l'acide palmitique, de l'acide linoléique, de l'acide laurique, de l'acide stéarique et de l'acide linoléique. Il est utilisé dans le cancer, les douleurs mammaires, les hémorroïdes, la faiblesse et la dysenterie sanguine. Il est utile dans les hémorroïdes, les anthrax, les hémorroïdes, le diabète, les antipyrétiques, les hypotenseurs et les émoullients.

*Nigella sativa* (famille des Ranunculaceae), originaire du sud de l'Europe, de l'Asie et de l'Afrique du Nord, contenant 32 % à 53 % d'huile (85 % du total des graisses insaturées). Il contient des acides myristique, palmitique, stéarique, oléique, linoléique et linoléique comme principaux acides gras saturés et insaturés. C'est l'épice la plus couramment utilisée dans les cuisines du Moyen-Orient et de l'Inde.

La graine d'avocat (*Persea americana*) (famille des Lauracées), originaire du centre-sud du Mexique est également cultivée dans de nombreux autres pays. L'huile d'avocat est une huile naturelle obtenue par pressage de la pulpe de *Persea Americana*. Près de 70 % de l'huile d'avocat contient de l'acide oléique, qui est sain pour le cœur et des acides gras oméga-9 monoinsaturés. Le composant principal de l'huile d'avocat est un acide gras oméga-9 (acide gras monoinsaturé) dont il procure des bienfaits pour la santé tels que la réduction de la pression artérielle et d'autres maladies cardiovasculaires. De plus, l'avocat et l'huile d'olive ont été efficaces pour augmenter le HDL (bon cholestérol), réduire les triglycérides sanguins et le LDL taux de cholestérol. L'ajout d'huile d'avocat dans la salade (contenant de la laitue romaine, des carottes, des épinards) a augmenté l'absorption des caroténoïdes. C'est également une riche source de lutéine qui agit comme un antioxydant pour les yeux.

La mangue (roi des fruits ; famille des Anacardiaceae) est distribuée dans le monde entier et inventée comme fruit national de l'Inde et du Pakistan et l'arbre national du Bangladesh. Par rapport au soja et aux graines de coton où 20% d'huile est présente, le noyau de mangue (20% de fruits entiers et 75% de noyaux) contient 15% d'huile agréable au goût. L'huile de noyau de mangue peut être utilisée comme alternative au beurre de cacao dans les confiseries et aux antioxydants synthétiques en raison de la teneur élevée en phénols totaux par rapport aux autres huiles commerciales.

### **4.3. Biomasse**

En toute rigueur, la biomasse est l'ensemble de la matière d'origine vivante. Les textes français et européens donnent différentes définitions qui peuvent varier sur des points de détails. L'article 29 de la loi 2005-781 de programmation fixant les orientations de la politique énergétique dite " POPE", du 13 juillet 2005, la définit ainsi : "La fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers".

Les principales provenances de la biomasse sont : 1) l'agriculture, 2) la forêt, 3) les milieux marins et aquatiques, 4) les haies, les parcs et jardins (déchets verts), 5) les industries et activités humaines ayant traité de la matière d'origine vivante, y compris du bois (industries agro-alimentaires, papetières, de transformation du bois, etc...) et générant des co-produits, des déchets organiques (notamment les boues de stations d'épuration) ou des effluents d'élevages.

Les matériaux de biomasse lignocellulosiques non comestibles attirent de plus en plus l'attention en tant que ressources renouvelables, économiques et abondantes pour réduire la



dépendance vis-à-vis des ressources pétrolières et minimiser les coûts d'énergie et de matières premières. En plus de l'énergie et des carburants, la biomasse peut être utilisée pour créer de précieux produits chimiques et matériaux à base de carbone, appelés bioproduits. Ces produits sont les sucres et alcools de sucre, la glycérine, les furfurals, les fibres et dérivés de cellulose, les matières carbonées, les résines, les bioplastiques, etc.

Les alcools de sucre sont des produits importants dans l'industrie alimentaire. Par exemple, le xylitol est un alcool de sucre pentose utilisé comme substitut du sucre dans l'industrie alimentaire en raison de ses propriétés peu caloriques et anticancéreuses. De plus, le xylitol est un élément constitutif d'une variété de produits chimiques de base.

Le lactate d'éthyle est un solvant biodégradable produit par estérification de l'éthanol et de l'acide lactique, produits à partir de la biomasse. Il est utilisé dans des applications industrielles pour remplacer les composés organiques volatils dérivés du pétrole. L'acide lactique, qui est principalement produit par fermentation microbienne des glucides, est utilisé dans de nombreuses applications, notamment dans l'alimentation, les produits pharmaceutiques, les polymères, etc.

Les sucres C5 et C6 et leurs dérivés peuvent être soit incorporés dans le squelette du polymère, soit utilisés comme groupes pendants pour préparer des glycopolymères qui imitent les responsabilités structurelles et fonctionnelles des glycoprotéines.

## Chapitre 6 : Altérations alimentaires

### 1. Rôle de l'eau

La teneur en eau des produits alimentaires joue un rôle déterminant durant leur conservation. En effet, les micro-organismes ne peuvent pas se multiplier en absence d'eau. La qualité et la sécurité alimentaire dépendent du pH et de l'activité de l'eau ( $a_w$ ) dans l'environnement alimentaire. Les aliments ayant une activité de l'eau sont périssables. L'activité de l'eau, le pH, la température et d'autres paramètres ont un impact direct sur la croissance des micro-organismes, donc  $a_w$  et pH sont les deux paramètres les plus importants. L'eau libre disponible pour les moisissures, les levures et les bactéries est responsable de leur croissance et même de la production de toxines (Figure 22). Ou il peut participer à des réactions chimiques/biochimiques (ex : réactions de Maillard), qui peuvent détériorer : texture, saveur, couleur, goût, valeur nutritionnelle d'un produit, et sa stabilité (durée de conservation).

L'activité de l'eau ( $a_w$ ) a son application la plus utile pour prédire la croissance des bactéries, des levures et des moisissures. Pour qu'un aliment ait une durée de conservation utile sans dépendre du stockage réfrigéré, il est nécessaire de contrôler soit son niveau d'acidité (pH), soit le niveau d'activité de l'eau ( $a_w$ ), soit une combinaison appropriée des deux. Cela peut effectivement augmenter la stabilité du produit et permettre de prédire sa durée de conservation dans des conditions de stockage ambiantes connues.

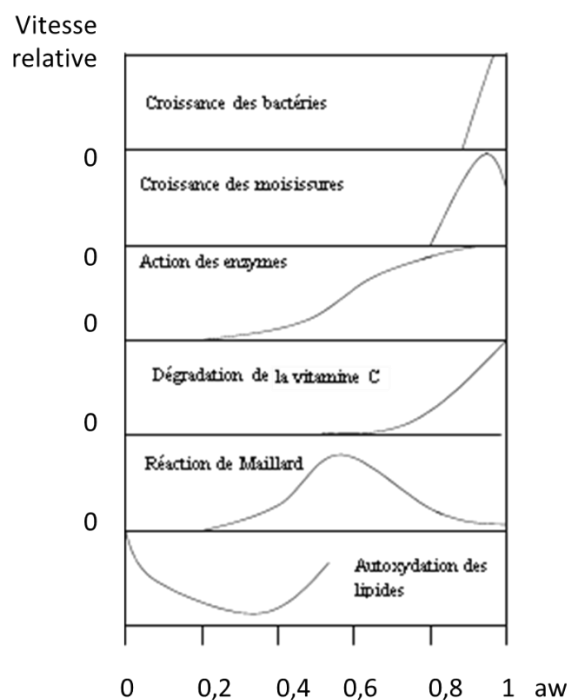


Figure 22 : L'influence de l'activité de l'eau sur quelques réactions dans les aliments.

## 2. Sources potentielles d'altérations

La détérioration des aliments peut être définie comme « tout changement sensoriel (tactile, visuel, olfactif ou gustatif) » que le consommateur considère comme inacceptable. La détérioration peut se produire à n'importe quel stade de la chaîne alimentaire. La détérioration peut résulter de dommages causés par des insectes, de dommages physiques (Par exemple : le brunissement enzymatique), d'une activité enzymatique indigène dans les tissus animaux ou végétaux ou d'infections microbiennes. La plupart des aliments naturels ont une durée de vie limitée. Les aliments périssables comme le poisson, la viande et le pain ont une courte durée de vie. D'autres aliments peuvent être conservés beaucoup plus longtemps, mais finissent par se décomposer. Les enzymes peuvent entraîner la destruction des polymères dans certains aliments tandis que des réactions chimiques telles que l'oxydation et le rancissement en décomposent d'autres, mais la principale cause de détérioration des aliments est l'invasion de micro-organismes tels que les moisissures, les levures et les bactéries. En cas de moisissure, une croissance velue recouvre la nourriture et elle devient molle et sent souvent mauvais. La contamination bactérienne est plus dangereuse car très souvent la nourriture n'a pas l'air mauvaise même si elle est gravement infectée, elle peut sembler tout à fait normale. La présence de toxines très dangereuses et de spores bactériennes n'est souvent détectée qu'après une épidémie d'intoxication alimentaire, un examen en laboratoire découvre l'agent infectieux.

Les principales technologies de conservation permettant de contrôler les divers types de détérioration des aliments sont les suivantes :

➤ **Conservation par la chaleur (procédés thermiques).** Les micro-organismes et les enzymes sont détruits à haute température. L'étendue de la destruction dépend de la température, du temps d'exposition et, bien entendu, de la résistance à la chaleur du microorganisme ou de l'enzyme en question dans le milieu donné. L'exposition à des températures élevées ne détruit pas seulement les micro-organismes et les enzymes ; il accélère également une multitude de réactions chimiques entraînant des changements dans la texture, la saveur, l'apparence, la couleur, la digestibilité et la valeur nutritionnelle des aliments. Certains de ces changements sont souhaitables et constituent le processus complexe connu sous le nom de « cuisson ». D'autres sont répréhensibles et sont collectivement appelés « dommages thermiques ». Une connaissance approfondie de la cinétique de conservation thermique, des réactions de cuisson et des mécanismes d'endommagement thermique est essentielle pour l'optimisation des procédés thermiques.

➤ **Conservation par évacuation de la chaleur (procédés à basse température).** L'activité des micro-organismes et des enzymes ainsi que la vitesse des réactions chimiques sont réduites à basse température. Contrairement à la chaleur, la basse température ne détruit pas les enzymes et les micro-

organismes de manière significative, mais réduit simplement leur activité. Une telle dépression ne reste en place que tant que la basse température est maintenue. Il cesse de fonctionner lorsque la température augmente.

➤ **Préservation par réduction de l'activité de l'eau.** Il est bien connu que les micro-organismes ne peuvent pas se développer à des niveaux d'activité de l'eau inférieurs à une valeur limite selon le micro-organisme. L'activité enzymatique est également dépendante de l'activité de l'eau. Le séchage, la concentration et l'ajout de solutés (sucre, sel) sont des techniques de conservation basées sur la réduction de l'activité de l'eau.

➤ **Rayonnement ionisant.** Les rayonnements ionisants ont la capacité de détruire les micro-organismes et d'inactiver les enzymes. Cette technique de conservation puissante a un grand potentiel en tant que solution à de nombreux problèmes dans la production et la distribution des aliments.

➤ **Conservation chimique.** Deux des plus anciennes techniques de conservation des aliments, à savoir le salage et le fumage, sont basées sur les effets des produits chimiques du sel et de la fumée sur les micro-organismes. De nombreux agents pathogènes ne peuvent pas se développer à un pH bas, d'où l'utilisation d'acides comme conservateurs alimentaires. Le pH des aliments peut être abaissé soit par l'ajout d'acides (acide acétique ou vinaigre, acide citrique ou jus de citron, acide lactique, etc.) soit par la production in situ d'acides (principalement lactiques) par fermentation. De nombreuses substances chimiques non naturelles (par exemple, le dioxyde de soufre, l'acide benzoïque, l'acide sorbique) sont efficaces pour prévenir ou retarder certains types de détérioration des aliments (conservateurs alimentaires contre la détérioration microbienne, antioxydants contre la détérioration oxydative, stabilisants contre modifications indésirables de la texture et de la structure, etc.). L'utilisation de ces produits chimiques est soumise aux lois et réglementations alimentaires.

L'objectif principal de l'emballage est de fournir une barrière protectrice entre les aliments et l'environnement. Les fonctions de conservation des emballages alimentaires incluent la prévention de la contamination microbienne, le contrôle des échanges de matériaux (vapeur d'eau, oxygène, substances odorantes) entre l'aliment et son environnement, la protection contre la lumière, etc. Récemment, les matériaux d'emballage contenant des agents conservateurs (par exemple, des antioxydants) ont été développés. Cette nouvelle technologie est connue sous le nom d'emballage actif.

### 3. Altérations microbiologiques, enzymatiques et chimiques

#### *Altérations microbiologiques*

La plupart des produits alimentaires contiennent des micro-organismes, exceptés quelques rares produits alimentaires qui sont naturellement stériles (comme par exemple le contenu des œufs frais.) Les légumes et les fruits sont porteurs de germes normalement présents dans le sol, l'air ou

l'eau. Les viandes contiennent des germes initialement présents chez l'animal ou qui sont introduits au cours des différentes opérations de préparation. Certains de ces micro-organismes sont néfastes à la qualité de l'aliment, d'autres au contraire sont indispensables parce qu'ils participent à l'élaboration de l'aliment. Il existe un certain nombre dont la présence ou la prolifération dans l'aliment peut avoir des conséquences plus ou moins graves pour le consommateur.

Les micro-organismes peuvent être les causes des maladies. L'aliment peut être porteur de quelques germes pathogènes, qui vont se multiplier dans le corps humain et causer des maladies (fièvre typhoïde, choléra, dysenterie). L'aliment peut être le milieu où se multiplie une grande quantité de micro-organismes qui, après, sont consommés avec l'aliment (intoxication alimentaire paratyphoïde). L'aliment peut être le milieu de multiplication de micro-organismes, qui sécrètent des substances toxiques (botulisme ; intoxication par les staphylocoques). Les maladies provoquées par l'altération des aliments sont les maladies infectieuses (Elles sont dues à la prolifération du germe au détriment du tissu de l'hôte), les toxi-infections (les germes  $[10^6 - 10^9]$  produisent des substances toxiques spécifiques dont le pouvoir toxique dépend de la charge microbienne) et les intoxications (sont dues à des exotoxines produites par les micro-organismes ; dans ces cas, la présence des germes mêmes dans l'organisme de l'hôte n'est pas indispensable).

Les facteurs les plus importants qui influencent la croissance des micro-organismes dans les aliments sont : le pH, la température, l'activité de l'eau et le potentiel d'oxydo-réduction. L'altération de l'aliment est perceptible à des taux supérieurs à  $10^7$  bactéries/g et  $10^5$  levures/g.

La modification des glucides s'effectue de plusieurs façons :

- l'hydrolyse des polysaccharides, ce qui affecte la texture du produit ;
- les fermentations alcoolique, lactique, butyrique, gluconique, le cycle de Krebs, etc.
- la formation des acides carboxyliques, d'alcools, de cétones, d'aldéhydes, des odeurs et des saveurs.

La modification des protéines s'effectue de diverses façons :

- l'hydrolyse des protéines en peptides et acides aminés affectant ainsi la texture du produit ;
- les réactions de décarboxylation conduisant à la formation d'amines ;
- les réactions de désamination conduisant à la formation d'acides organiques +  $\text{NH}_3$ .
- la fermentation putride et la putréfaction résultant de ces différentes réactions.

La modification des lipides est la résultante de deux types de réactions :

- la lipolyse qui conduit à la libération des acides gras,
- l'oxydation des lipides conduisant au phénomène de rancissement.

La dégradation des aliments par les micro-organismes entraîne successivement la modification de l'odeur, de la couleur, du goût et de l'aspect. Les odeurs sont variables selon la nature de la molécule qui en est responsable ; exemple : triméthylamine, mercaptan, diméthylsulfure, sulfure d'hydrogène, ammoniac, acide butyrique, dia-cétyle, rancissement. Concernant la couleur, l'altération des produits se caractérise souvent par l'apparition de zones colorées à la surface. Cette modification de couleur est essentiellement due à la synthèse de pigments, et à la destruction ou la transformation de pigments naturels (carotène, myoglobine, polyphénols). La modification du goût est caractérisée essentiellement par l'aigreur du produit. La dégradation de l'aspect, la structure et la texture résulte de la modification de macromolécules (pectine, hémicellulose, protéines) et la synthèse de macromolécules (exemple : dextrane).

L'une des conséquences de l'altération d'origine microbienne des aliments est la modification de la valeur nutritionnelle pouvant conduire à son amélioration ou le plus souvent à sa perte. La valeur nutritionnelle est affectée par :

- la réduction de la valeur calorique possible (négative),
- la synthèse de molécules à activités biologiques (positive ou négative selon les cas),
- la destruction des produits toxiques/antinutritionnels (positive),
- la putréfaction (négative).

Le tableau ci-dessous illustre la dégradation microbienne de certains types d'aliments.

**Tableau 25** : Dégradation d'origine microbienne des principaux types d'aliments

<b>Aliment</b>	<b>Type de dégradation</b>	<b>Micro-organismes incriminés</b>
Beurre et matières grasses	Colorations	<i>Pseudomonas, Penicillium spp, Serratia</i>
	Goût, odeurs	<i>marcescens</i>
	Rancissement	<i>Pseudomonas, Candida spp</i> <i>Pseudomonas fragi, P. fluorescens</i>
Bière	Dépôts	Levures
	Goûts divers	Coliformes, levures "sauvages", <i>Pediococcus cerevisiae, Zymomonas spp</i>
	Piqûre acétique	<i>Gluconobacter</i>
	Piqûre lactique	<i>Lactobacillus spp</i>
Charcuterie	Viscosité	<i>Lactobacillus brevis</i>
	Acidification	Bactéries lactiques
	Colorations	<i>Leuconostoc, Pseudomonas spp</i>
	Moisissure	<i>Aspergillus, Penicillium spp</i>
	Viscosité	<i>Leuconostoc, Streptococcus spp, levures</i>

**Tableau 25 (Suite)**

<b>Aliment</b>	<b>Type de dégradation</b>	<b>Micro-organismes incriminés</b>
Conserves	Fermentation de type butyrique avec bombage	<i>Bacillus gazogènes, Clostridium butyricum, Cl. perfringens, Cl. Thermosaccharolyticum</i>
	“Flat sour” Noircissement Putréfaction	<i>Bacillus coagulans, B. stearothermophilus Clostridium nigrificans Clostridium putrefaciens, Cl. Sporogenes</i>
Farine	Fermentation Moisissure	<i>Bacillus spp, Levures Aspergillus, Penicillium spp, Mucorales</i>
Fromages	Gonflement butyrique	<i>Clostridium butyricum Bactéries protéolytiques, Bacillus polymyxa, Enterobacter aerogenes</i>
	Viscosité	<i>Alcaligenes, Pseudomonas spp</i>
Fruits	Anthracnose Moisissure	<i>Alternaria, Aspergillus, Penicillium spp. Botrytis cinerea Rhizopus nigricans</i>
	Pourriture molle	
Jus de fruits et sirops sucrés	Mauvais goût et fermentation alcoolique	<i>Byssochlamys, Rhizopus spp, levures</i>
	Piqûre acétique	<i>Acetobacter, Gluconobacter spp</i>
	Piqûre lactique	<i>Bactéries lactiques diverses</i>
	Troubles et dépôts Viscosité	<i>Leuconostoc spp</i>
Fruits secs	Fermentation alcoolique et goût de levure	<i>Saccharomyces, Zygosaccharomyces spp</i>
Lait	Colorations et goûts divers	<i>Pseudomonas syncynea, P. fluorescens</i>
	Protéolyse	<i>Bacillus, Pseudomonas spp.</i>
	Protéolyse avec gaz	<i>Coliformes, Clostridium spp.</i>
	Sûrissage et coagulation Viscosité	<i>Streptococcus lactis et autres bactéries lactiques Alcaligenes viscosus, Leuconostoc, Streptococcus spp.</i>
Légumes	Anthracnose	<i>Colletotrichum lindemuthianum</i>
	Fermentation acide et viscosité	<i>Aspergillus, Fusarium, Trichoderma spp., Arthrobacter, Cellulomonas spp.</i>
	Moisissure	<i>Botrytis cinerea, Alternaria, Aspergillus, Fusarium, Penicillium, Peronospora, Phytophthora</i>
	Pourriture molle	<i>Erwinia carotovora, Xanthomonas spp., Rhizopus spp., Sclerotia sclerotinium</i>

**Tableau 25 (Suite)**

<b>Aliment</b>	<b>Type de dégradation</b>	<b>Micro-organismes incriminés</b>
Œufs	Colorations diverses	<i>Proteus melanogenes, Pseudomonas, Rhodotorula spp., Serratia marcescens</i>
	Moisissure	<i>Cladosporium, Penicillium, Sporotrichum spp</i>
Pain	Goût “crayeux”	<i>Endomycopsis fibuliger, Trichosporon spp.</i>
	Moisissure	<i>Aspergillus niger et autres Aspergillus, mucorales, Penicillium spp.</i>
	Viscosité	<i>Bacillus spp.</i>
Poisson	Modification de couleur	<i>Achromobacter, Flavobacterium, Pseudomonas spp.</i>
Viandes	Putréfaction	<i>Coliformes, Clostridium, Pseudomonas spp.</i>
	Modification de couleur et odeur	levures, <i>Leuconostoc, Pseudomonas, Rhodotorula spp.</i>
	Moisissure	<i>Aspergillus, Penicillium spp., mucorales, Sporotrichum carnis, Thamnidium elegans</i>
	Putréfaction	Clostridium protéolytiques, <i>coliformes, Proteus spp</i>
	Sûrissement	<i>Bacillus cereus, Clostridium butyriques, bactéries lactiques</i>
	Viscosité	<i>Bacillus, Pseudomonas spp., bactéries lactiques</i>

### ***Altérations enzymatiques***

Les aliments peuvent contenir des glucides métabolisables (tels que les monosaccharides et les disaccharides), des composés azotés (tels que les petits peptides, les acides aminés, les nucléosides, les nucléotides, l'urée, la créatine et l'oxyde de triméthylamine), des acides gras libres et des acides organiques (tels que les acides lactique et acides maliques). Les micro-organismes produisent des enzymes intracellulaires (telles que des endonucléases, des mucopeptidase et des protéinases) pour utiliser des composés alimentaires de faible poids moléculaire en les transportant dans les cellules, ce qui provoque une détérioration détectable des aliments.

Les cellules microbiennes lysées libèrent les enzymes intracellulaires et ces enzymes peuvent provoquer la détérioration des aliments. Si le nombre initial de micro-organismes dans les aliments est faible, la détérioration par les enzymes microbiennes serait faible. Si un aliment est fortement contaminé par un grand nombre de cellules microbiennes initiales, le ou les traitements peuvent tuer les micro-organismes mais leurs enzymes ne peuvent pas être inactivées. Ces enzymes restantes peuvent causer la détérioration des aliments. Dans les aliments traités thermiquement, plusieurs enzymes thermostables des micro-organismes conservent leur activité après la mort des cellules. Ces



enzymes peuvent décomposer les nutriments et provoquer une détérioration lors du stockage ultérieur des aliments. Les enzymes extracellulaires responsables de la détérioration des aliments traités thermiquement sont les protéinases, les lipases et les phospholipases des bactéries psychrotrophes et les amylases.

De nombreuses réactions de détérioration importantes dans les aliments sont causées par des enzymes. Les processus catalysés par des enzymes peuvent contribuer à la détérioration de la qualité, en particulier dans les aliments transformés. Par exemple, pour le jus d'orange, une suspension colloïdale stable est souhaitée, l'action de la pectine méthyl estérase (PME) est indésirable car la déméthylation de la pectine, catalysée par cette enzyme, conduit à la séparation du sérum. L'inactivation de ces enzymes par traitement thermique du jus d'orange n'est pas souhaitable étant donné qu'une réaction non enzymatique à des températures élevées affecte négativement la saveur délicate du produit. Les hydrolases (provoquent une réaction hydrolytique) et les oxydoréductases (provoquent une oxydo-réduction) sont les principales enzymes responsables de la détérioration des aliments. Les enzymes hydrolytiques rompent les liaisons chimiques qui impliquent l'eau dans le mécanisme.

Les alpha-amylases hydrolysent les liaisons glucosidiques  $\alpha$ -1-4 dans l'amidon, ce qui donne des dextrans, du maltose et du maltotriose. La bêta-amylase hydrolyse les liaisons glycosidiques  $\alpha$ -1-6 de l'extrémité non réductrice de l'amidon et donne du maltose. La glucoamylase hydrolyse les liaisons glucosidiques  $\alpha$ -1-4 et  $\alpha$ -1-6 dans l'amidon pour produire du glucose. Ces enzymes peuvent être naturellement présentes dans les aliments ou être produites par des micro-organismes. La glucose oxydase catalyse l'oxydation du glucose en consommant l'oxygène de l'air en acide D-gluconique. Les lipoxygénases catalysent l'oxydation des lipides en présence d'oxygène. Il initie le rancissement oxydatif des lipides végétaux contenant une forte proportion d'acides gras insaturés et provoquant des saveurs désagréables. Des exemples d'enzymes et leur contribution à la perte de qualité dans des aliments spécifiques sont résumés dans le tableau 26.

Les enzymes peuvent être inhibées par l'un des éléments suivants : le sulfite réagit avec la quinone pour empêcher d'autres étapes chimiques, le pH dans le vinaigre (acides citriques), le traitement thermique, l'hexamétaphosphate/ascorbate/citrate de sodium, l'EDTA, le sucre (limite l'oxygène diffusion), emballage sous vide, cystéine, blanchiment et irradiation.

**Tableau 26 :** Certaines réactions catalysées par des enzymes provoquant la détérioration des aliments.

<b>Enzyme</b>	<b>Contribution à la détérioration des aliments</b>
Protéase alcaline	Les protéases alcalines thermostables peuvent provoquer la gélification des produits laitiers transformés en UHT
Acide ascorbique oxydase	Les acides ascorbiques sont oxydés et entraînent une perte de vitamine C dans les fruits, les légumes et les jus
Cellulase	Entraîne une perte d'intégrité de la texture et un ramollissement des aliments végétaux, et libère du glucose
Chlorophyllase	L'élimination de la chaîne latérale phytol de la chlorophylle provoque le déglaçage des aliments végétaux (comme les légumes verts)
Lipase	Hydrolyse la matière grasse du lait pour libérer les acides gras à chaîne courte et provoquer le rancissement et les mauvais goûts (comme dans le lait et la viande)
Lipoxygénase	La formation d'hydroperoxydes peut provoquer le blanchiment des pigments, la saveur offensive provoque un changement de texture, la destruction de la vitamine A et la perte de nutriments (comme sur les graines de légumineuses)
Pectinases	Destruction de la substance pectique, ce qui entraîne une perte d'intégrité de la texture et un ramollissement (comme dans les légumes et les fruits).
Peroxydase	La décomposition des peroxydes d'hydrogène avec génération de radicaux libres provoque un brunissement, un mauvais goût, etc. (comme dans les légumes et les fruits)
Phospholipase	Dénaturation des protéines musculaires et détérioration de la texture (comme chez le poisson)
Polyphénoloxydase	Brunissement, mauvais goût et perte de vitamines (comme dans les fruits, les légumes et les crustacés)
Protéinases	Décomposition des protéines avec formation d'acides aminés et de petits peptides pour donner une saveur amère, réduction de la durée de conservation, hypertendresse (comme dans les œufs, le poisson et la farine)
Thiaminase	Décomposition de la thiamine (comme dans les crustacés et la viande)
Triméthylamine oxyde déméthylase	Libère du formaldéhyde dans le poisson congelé contribuant à l'agrégation des protéines et à la détérioration de la texture

### *Altérations chimiques*

La détérioration chimique comprend les réactions catalysées par les enzymes ainsi que les réactions non enzymatiques. En général, les réactions catalysées par les enzymes se produisent dans les tissus végétaux et animaux non transformés, et les réactions non enzymatiques (chimiques) prédominent dans les aliments correctement transformés. Parfois, des réactions de détérioration enzymatiques et non enzymatiques peuvent agir en continu. Par exemple, la décoloration de la surface des viandes rouges est causée par une réaction non enzymatique avec l'oxydation de la myoglobine ( $\text{Fe}^{2+}$ ) pour former la metmyoglobine ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Les réactions enzymatiques avec la respiration à la surface des tissus peuvent réduire la concentration en oxygène et favoriser indirectement l'oxydation non enzymatique de la myoglobine. Certains tissus musculaires contiennent également l'enzyme metmyoglobine réductase, qui catalyse la réduction de la metmyoglobine en myoglobine.

Dans le cas d'aliments traités thermiquement ou transformés différemment où les enzymes ont été détruites ou leur activité a été arrêtée, les réactions chimiques non enzymatiques jouent un rôle plus important dans la détérioration des aliments. Les changements non enzymatiques pendant la transformation et le stockage des aliments entraîneront une perte de qualité. Les deux réactions non enzymatiques les plus importantes dans les aliments sont le brunissement de Maillard et l'oxydation des lipides.

La vitesse des réactions non enzymatiques dans les aliments est fonction d'un ou de plusieurs facteurs, notamment le pH, la température, la force ionique, la concentration des réactifs, la présence de catalyseurs, la mobilité des réactifs, le potentiel d'oxydo-réduction, les réactions concurrentes et l'état physique du produit. L'une des variables les plus importantes influençant les changements chimiques dans les aliments est la température.

## Références

- Adrian J., 1987. Les vitamines. In : CEPIL. Le lait matière première de l'industrie laitière. CEPIL - INRA, Paris, 113-119.
- AFSSA, 2007. Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations. pp : 461. <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Proteines.pdf>
- Al-Muhtaseb A. H., McMin W. A. M. & Magee T. R. A., 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. Food and Bioproducts Processing, 80(2): 118-128.
- Andrade R. D. P., Lemus R. M., Pérez C. E. C., 2011. Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. Vitae, Revista De La Facultad De Química Farmacéutica, 18(3), 325-334.
- Bahrani S. A., 2012. Modification des Propriétés Physico-Chimiques de l'Amidon par Procédés Hydrothermiques : Contribution à l'étude des Transferts Couplés Chaleur-Masse. Thèse de Doctorat, Université de LA ROCHELLE. France. Pp : 225.
- Berk Z., 2013. Spoilage and Preservation of Foods. In; Food Process Engineering and Technology. Chapter 16. 395–398. doi:10.1016/b978-0-12-415923-5.00016-2
- Cummings J. H., 1984. Cellulose and the human gut. Gut, 25, 805-810. 10.1136/gut.25.8.805
- Cuvelier M-E. et Maillard M-N., 2012. Stabilité des huiles alimentaires au cours de leur stockage. OCL, 19(2): 125-132.
- Dengerink J. & Vellema S., 2018. Food systems from concept to practice and vice versa. Wageningen University & Research. The Netherlands. <https://doi.org/10.18174/464054>.
- Dowd C. J. & Kelley B., 2011. Purification Process Design and the Influence of Product and Technology Platforms. In: Comprehensive Biotechnology. Second edition. Pp : 799-810. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00137-9>
- Erkmen O. Bozoglu T. F., 2016. Enzymatic and Nonenzymatic Food Spoilage. In: Food Microbiology: Principles into Practice, Chapter 24, 401–406. doi:10.1002/9781119237860.ch24
- Eymard S., 2003. Mise en évidence et suivi de l'oxydation des lipides au cours de la conservation et de la transformation du chinchard (Trachurus trachurus) : choix des procédés. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France. Pp : 217.

- FAO, 2008. Graisses et acides gras dans la nutrition humaine. Rapport d'une consultation d'experts. Genève. Pp 194.
- FAO, 2015. Composition de la viande. [https://www.fao.org/ag/againfo/themes/fr/meat/backgr\\_composition.html](https://www.fao.org/ag/againfo/themes/fr/meat/backgr_composition.html)
- FAO, 2021. La composition du lait. <https://www.fao.org/dairy-production-products/products/la-composition-du-lait/fr/>
- Favier J. C., 1989. Valeur nutritive et comportement des céréales au cours de leurs transformations. Céréales eu régions chaudes. AUPELF-UREF, Eds John Libbey Eurotext, Paris. pp. 285-297.
- Figuroa L. E. & Genovese D. B., 2018. Pectin gels enriched with dietary fibre for the development of healthy confectionery jams. Food Technol. Biotechnol. 56 (3): 441-453.
- Gasana J., 2014. Water and health. Air Water Borne Diseases 3: e129. doi:10.4172/2167-7719.1000e129
- Gaucheron F. et Tanguy G., 2009. Modifications de la qualité biochimique des laits et des produits laitiers par la technologie. Renc. Rech. Ruminants, 16 : 131-134.
- Geay Y., Bauchart D., Hocquette J-F, Culioli J., 2002. Valeur diététique et qualités sensorielles des viandes de ruminants. Incidence de l'alimentation des animaux. INRA Prod. Anim., 15 (1), 37-52.
- Guide d'information à l'attention des administrations et des établissements publics, 2007. La valorisation de la biomasse. <https://www.ademe.fr>. pp : 6.
- HLPE, 2018. Nutrition et systèmes alimentaires. Un rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition. <http://www.fao.org/cfs/cfs-hlpe/fr/>
- INRA, 2007. Les fruits et légumes dans l'alimentation, enjeux et déterminants de la consommation. Rapport d'expertise réalisé par l'INRA. Pp : 374.
- Institut Français de l'éducation, 2020. Propriétés physico-chimiques de l'eau. <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/limites/eau/comprendre/proprietes-physico-chimique-de-leau>
- Irmak S., 2017. Biomass as Raw Material for Production of High-Value Products. In: Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy. pp: 203-204. doi:10.5772/65507
- Jain J. L., Jain S. K. & Jain N., 2005. Fundamentals of biochemistry: for university and college students in India and abroad. Chapter 11, Proteins-III general properties. Ed New Delhi : S. Chand & Company PVT, P: 214-219.

[https://books.google.dz/books?id=WS8cEAAAQBAJ&pg=PA262&lpg=PA262&dq=Computer-generated+model+of+the+protein+pepsin,+chapter+11&source=bl&ots=ee\\_HzyWWgS&sig=ACfU3U3TKDtAy4L9uuedq6B3QgF5FSuPg&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwi84ea1iPjzAhU15eAKHWB1BCQQ6AF6BAgLEAM#v=onepage&q=Computer-generated%20model%20of%20the%20protein%20pepsin%2C%20chapter%2011&f=false](https://books.google.dz/books?id=WS8cEAAAQBAJ&pg=PA262&lpg=PA262&dq=Computer-generated+model+of+the+protein+pepsin,+chapter+11&source=bl&ots=ee_HzyWWgS&sig=ACfU3U3TKDtAy4L9uuedq6B3QgF5FSuPg&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwi84ea1iPjzAhU15eAKHWB1BCQQ6AF6BAgLEAM#v=onepage&q=Computer-generated%20model%20of%20the%20protein%20pepsin%2C%20chapter%2011&f=false)

Jensen R. G., 1995. Handbook of milk composition. Academic Press, San Diego.

Kamel H., Le C.F., Salter A. M. & Ali A., 2021. Extraction of protein from food waste: An overview of current status and opportunities. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 1-21. DOI: 10.1111/1541-4337.12739

Kostadin F., 2003. Congélation des aliments. Technical University of Sofia, Bulgarie. pp 60.

Lahbari M., 2015. Etude et simulation du séchage de l'abricot : application à quelques variétés de la région des Aurès. Thèse de doctorat, université de Batna. pp :129.

Lavanya D. *al.*, 2011. Sources of cellulose and their applications- A review. *International journal of drug formulation and research*, 2(6), 19-38.

Litchfield J. H., 2000. Foods, Nonconventional. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.* <https://doi.org/10.1002/0471238961.0615150412092003.a01>

Mahé J., 2018. La pectine-Applications d'un polymère biodégradable dans le domaine de la santé. Thèse de Doctorat, faculté de santé, université d'Angers, France. pp : 100.

Maktouf S., 2013. Activités amylase et lichenase d'une nouvelle souche de *Bacillus* : Production sur milieu solide et caractérisation. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France. Pp : 145.

Marfaing H. et Lerat Y., 2007. Les algues ont-elles une place en nutrition ? *Phytothérapie*, Numéro Hors-Série: HS2–HS5. DOI 10.1007/s10298-007-0227-5.

Mbougoung P. D., 2009. Influence des amidons natifs ou acetyles de manioc et de pomme de terre sur les propriétés physico-chimiques et texturales du pâte de bœuf (*Bos indicus*). Thèse de Doctorat, Université de Ngaoundere, France. Pp : 171.

Mohnen D., 2008. Pectin structure and biosynthesis. *Current Opinion in Plant Biology*, 11:266–277.

Morin O. et Pages-Xatart-Pares X., 2012. Huiles et corps gras végétaux : ressources fonctionnelles et intérêt nutritionnel. *OCL*; 19(2): 63-75. doi : 10.1684/ocl.2012.0446

- Nevara G. A., Muhammad S. K. S., Zawawi N., Mustapha N.A, Karim R., 2021. Dietary Fiber: Fractionation, Characterization and Potential Sources from Defatted Oilseeds. *Foods*, 10, 754. <https://doi.org/10.3390/foods10040754>
- Nout R., Hounhouigan J. D. et van Boekel T., 2003. Les aliments, Transformation, Conservation et Qualité. Backhuys Publishers, Pays-Bas. Pp : 4.
- Nys Y, Sauveur B., 2004. Valeur nutritionnelle des œufs. *INRA Prod. Anim.*, 17 (5), 385-393.
- OMS, 2019. Eau. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Pérez S., 2000. Structure et morphologie de la cellulose. Centre de Recherches sur les Macromolécules Végétales –CNRS- associé à l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France. <https://www.researchgate.net/publication/281877184>
- Porquier A., 2016. Etude des mécanismes de régulation du métabolisme secondaire chez *Botrytis cinerea*, l'agent de la pourriture grise. Thèse de Doctorat. Université PARIS-SACLAY, France. Pp : 305.
- Potier de Courcy G, Frelut M. L., Fricker J., Martin A. et Dupin H., 2003. Besoins nutritionnels et apports conseillés pour la satisfaction de ces besoins. *Encycl Méd Chir*, 10-308-A-10, 32 p.
- Pougheon S. I. A. S., 2001. Contribution à l'étude des variations de la composition du lait et ses conséquences en technologie laitière. Thèse de Doctorat, l'Université Paul-Sabatier de Toulouse, France. pp : 31,35.
- PRAS O., 2006. Utilisation de cellulose pour l'élaboration de matériaux photoluminescents ou conducteurs. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, France. Pp : 239.
- Ratnayake W.M.N. & Galli C., 2009. Fat and Fatty Acid Terminology, Methods of Analysis and Fat Digestion and Metabolism: A Background Review Paper. *Ann Nutr Metab*, 55:8–43.
- Rawat S., 2015. Food Spoilage: Microorganisms and their prevention. *Asian Journal of Plant Science and Research*, 5(4):47-56.
- Rémond D. et Walrand S., 2017. Les graines de légumineuses : caractéristiques nutritionnelles et effets sur la santé. *Innovations Agronomiques*, 60(2017), 133-144.
- Sandulachi E., 2012. Water activity concept and its role in food preservation. *Revista științifică «Meridian Ingineresc»*, 4, <http://repository.utm.md/handle/5014/780>
- Safefood 360, 2014. Water Activity (aw) in Foods, [www.safefood360.com](http://www.safefood360.com)

- Sawicka B., Umachandran K., Nasir N. A. & Skiba D., 2020. Alternative and New Protein Sources. In: Egbuna C., & Dable Tupas G. (Eds.). Functional Foods and Nutraceuticals. pp 109-137. doi:10.1007/978-3-030-42319-3.
- Sharp K.A., 2001. Water: Structure and Properties. Encyclopedia of Life Sciences. John Wiley & Sons, Ltd. [www.els.net](http://www.els.net)
- Srivastava Y., Semwal A. D., & Dhiman A., 2021. A comprehensive review on processing, therapeutic benefits, challenges, and economic scenario of unconventional oils. Journal of Food Processing and Preservation, 45(2). doi:10.1111/jfpp.15152
- Thirumurugan D., Cholarajan A., Raja S. S. S. & Vijayakumar R., 2018. An Introductory Chapter: Secondary Metabolites. Secondary Metabolites - Sources and Applications. doi:10.5772/intechopen.79766
- Touitou Y., 2005. Biochimie : structure des glucides et lipides. Faculté de médecine, Université Paris-VI.
- Vuillemard J. C., Gauthier S. et Paquin P., 1989. Les ingrédients à base de protéines laitières : obtention, propriétés et utilisations. Lait, (1989) 69, 323-351.