



# LA CONSERVATION DES ALIMENTS VERS PLUS DE DURABILITÉ ET DE NATURALITÉ

A. KONDJOYAN, C. RENARD, P. DOLE, L. FOURNAISON,  
H.-M. HOANG-LE, Y. LE LOIR, C. PÉNICAUD, M. ZAGOREC, F. ZUBER

éditions  
**Quæ**



# LA CONSERVATION DES ALIMENTS

VERS PLUS DE DURABILITÉ  
ET DE NATURALITÉ

ALAIN KONDJOYAN, CATHERINE RENARD,  
PATRICE DOLE, LAURENCE FOURNAISON,  
HONG-MINH HOANG-LE, YVES LE LOIR,  
CAROLINE PÉNICAUD, MONIQUE ZAGOREC,  
FRANÇOIS ZUBER

**Dans la même collection**

*Les enjeux de l'oie*

*Dynamique de population et gestion adaptative*

M. Guillemain, 2025, 108 p.

*Les invasions biologiques marines*

P. Gouletquer, 2024, 130 p.

*Désertification et changement climatique, un même combat ?*

B. Bonnet, J.-L. Chotte, P. Hiernaux, A. Ickowicz, M. Loireau (coord.),

2024, 128 p.

*L'acidification des océans*

*Quels effets, quelles solutions ?*

F. Pernet, F. Gazeau, 2024, 124 p.

**Pour citer cet ouvrage**

Kondjoyan A., Renard C., Dole P., Fournaison L., Hoang-Le H.-M., Le Loir Y., Pénicaud C., Zagorec M., Zuber F., 2025. *La conservation des aliments. Vers plus de durabilité et de naturalité*, Versailles, éditions Quæ, 170 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4078-4>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication (<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>).

La procédure d'évaluation est décrite dans Prism  
(<https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/25780>).

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par IA.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



© Éditions Quæ, 2025

ISBN papier : 978-2-7592-4077-7  
ISBN epub : 978-2-7592-4079-1

ISBN PDF : 978-2-7592-4078-4  
ISSN : 2267-3032

Éditions Quæ  
RD 10  
78026 Versailles Cedex

[www.quae.com](http://www.quae.com)  
[www.quae-open.com](http://www.quae-open.com)



# Sommaire

Introduction .....	5
--------------------	---

## **Pourquoi et comment conserve-t-on traditionnellement les aliments? .....**

Phénomènes à l'origine de l'évolution des aliments .....	8
Développement des procédés de conservation au cours de l'histoire .....	17

## **Pourquoi les procédés de conservation sont-ils remis en question? .....**

Les notions de «durabilité» et de «naturalité» .....	30
Des consommateurs suspicieux vis-à-vis des aliments transformés .....	32
Conséquences de la suspicion envers les aliments transformés sur la durabilité des filières .....	37

## **Reformuler pour plus de «naturalité»? .....**

Stabilité microbiologique du produit .....	42
Stabilité de la texture du produit .....	52

## **Fermentation et biopréservation : comment associer durabilité et naturalité? .....**

Historique des recherches et évolution des méthodes .....	56
Les outils omiques au service des innovations de rupture .....	59
Les aliments fermentés .....	60
Développement de la biopréservation .....	66
Microbiotes des aliments : de nouvelles espèces en lien avec l'altération ou la préservation des aliments .....	68
Des activités bactériennes à contrôler .....	70
La fermentation, source d'innovations et de rupture .....	72

## **Est-il possible d'imaginer des procédés thermiques plus durables? .....**

Optimiser la chaleur dans la stérilisation et la pasteurisation .....	76
Peut-on aller vers un froid plus durable? .....	88



<b>Décontamination athermique et technologies barrières: une association plus durable et plus sûre?</b>	102
Présentation des technologies athermiques .....	103
Intérêts et limites des technologies athermiques .....	107
Le concept de technologies barrières .....	109
<b>Quel rôle pour les emballages?</b> .....	114
Une nouvelle réglementation pour réduire la pollution plastique .....	114
Les emballages biosourcés: une solution plus vertueuse? .....	117
Et si tous les emballages étaient (bio)dégradables? .....	120
Et si tous les emballages étaient réemployables? .....	122
Les emballages du futur: quels risques pour la santé? .....	128
La juste fonctionnalité de l'emballage, une question de couple .....	130
<b>La conservation au cœur de la transition alimentaire?</b> .....	135
Le lien amont-aval et l'impact des pratiques agroécologiques .....	135
Développer de nouvelles combinaisons de procédés et d'emballages en lien avec le comportement du consommateur .....	137
Évaluer l'impact environnemental des pratiques de transformation-conservation aux différentes échelles territoriales .....	141
L'intelligence artificielle et les outils d'aide à la décision au service de la durabilité des systèmes .....	146
<b>Conclusion</b> .....	149
<b>Annexe</b> .....	152
<b>Glossaire</b> .....	157
<b>Bibliographie</b> .....	165
<b>Liste des auteurs</b> .....	168



# Introduction

L'être humain est naturellement omnivore et peut donc consommer toutes sortes de produits d'origine végétale ou animale. Mais dès que l'animal est abattu ou pêché, le lait ou l'œuf prélevés, le produit végétal récolté, ils évoluent sous l'action de réactions biochimiques et microbiennes. Conserver des aliments sains le plus longtemps possible a été crucial pour la survie de l'espèce humaine, car les résultats de la chasse ou de la cueillette étaient souvent imprévisibles, et les productions agricoles cycliques, ce qui nécessitait d'assurer «la soudure» entre deux cycles de production. L'homme a donc très tôt mis au point des procédés de conservation des aliments dont les principes sont souvent encore utilisés aujourd'hui, même s'ils ont été industrialisés au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles.

Les procédés de conservation restent indispensables. En effet, la population mondiale est désormais majoritairement urbaine, les distances entre les zones agricoles et les bassins de consommation tendent à augmenter, et de nombreux consommateurs restent demandeurs d'aliments exotiques ou de produits hors saison qui ne peuvent pas être issus d'une agriculture locale. De plus, l'évolution des modes de vie s'oriente vers une réduction du temps hebdomadaire consacré aux courses et à la cuisine. Cette nécessité n'empêche pas les consommateurs de remettre de nombreux traitements de conservation en question, en les suspectant d'être préjudiciables à leur santé ou en leur reprochant de n'être pas naturels ou pas durables.

Pourtant, l'impact de la conservation sur la sécurité alimentaire est fondamental, puisqu'une déficience ou une mauvaise gestion des procédés de conservation peut signifier l'abondance ou, au contraire, la famine. Ainsi, l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) insiste régulièrement sur l'importance de la lutte contre les pertes et gaspillages en vue d'assurer la sécurité alimentaire d'une population mondiale en croissance, tandis que l'Union européenne s'est fixée comme objectif de

réduire de moitié les pertes et gaspillages d'ici 2030. Mais la réduction des pertes et gaspillages ne suffit pas, et l'amélioration des procédés de conservation doit plus généralement contribuer à réduire l'empreinte carbone des systèmes alimentaires qui, selon le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2022), représente actuellement entre 21 % et 37 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Cet ouvrage s'appuie sur les connaissances acquises par les ingénieurs et les chercheurs qui travaillent dans le domaine des procédés et des sciences de l'aliment. Il vise à offrir au lecteur une meilleure compréhension de la manière dont agissent les procédés de conservation, des questions qu'ils soulèvent, et des solutions que la recherche peut fournir pour y répondre. L'objectif est également d'éclairer les consommateurs sur les conséquences réelles que les modifications des procédés de conservation pourraient avoir sur notre santé et notre environnement.

L'ouvrage présente les phénomènes responsables de la dégradation des aliments et les méthodes qui ont été mises au point pour les conserver. Il explique ensuite pourquoi les procédés de conservation suscitent des interrogations chez les consommateurs-citoyens et montre en quoi l'évolution de la composition des aliments, de l'action des micro-organismes ou des procédés de conservation peut répondre à certaines exigences de naturalité et de durabilité. Une attention particulière est portée aux emballages, qui ont changé la distribution alimentaire, mais qui sont remis en question du fait de leurs impacts environnementaux. Enfin, la dernière partie de l'ouvrage met en lumière la façon dont les recherches sur la conservation sont au cœur de la transition vers des systèmes alimentaires plus durables, qui peuvent se décliner à des échelles locales comme à celles qui gouvernent les échanges nationaux et internationaux.



# POURQUOI ET COMMENT CONSERVE-T-ON TRADITIONNELLEMENT LES ALIMENTS?

La plupart des produits destinés à l'alimentation humaine évoluent fortement après la récolte, le prélèvement ou l'abattage. Certaines évolutions sont sensoriellement recherchées par les consommateurs, comme les fermentations, le séchage de certains fruits ou la maturation des viandes. L'objectif des procédés de conservation est à la fois de s'assurer que l'aliment n'est pas dangereux pour la santé humaine et de répondre aux attentes des consommateurs.

## LES DIFFÉRENTES DIMENSIONS DE LA QUALITÉ D'UN ALIMENT

La qualité d'un produit alimentaire réside dans son aptitude à satisfaire les utilisateurs. Ceux-ci sont multiples. Il s'agit bien sûr de ceux qui vont consommer le produit, mais aussi de ceux qui vont le fabriquer. Les fabricants et les distributeurs sont sensibles aux qualités technologiques. Les consommateurs attendent quant à eux que le produit soit sain (qualités sanitaires), bon pour leur santé (qualités nutritionnelles), agréable (qualités sensorielles ou **organoleptiques**<sup>1</sup>), facile à conserver, à préparer et à consommer (qualités d'usage). Les consommateurs-citoyens sont également concernés par la durabilité de la chaîne de production. À ces qualités, qui sont matériellement liées au produit, s'ajoutent des dimensions immatérielles, qui peuvent être symboliques (portée symbolique associée à la consommation de l'aliment), éthiques ou religieuses (juste, équitable, pure/impure, etc.).

---

1. Les termes en gras, mis en valeur à leur première occurrence pour chaque nouveau chapitre, possèdent une entrée dans le Glossaire en fin d'ouvrage.

## PHÉNOMÈNES À L'ORIGINE DE L'ÉVOLUTION DES ALIMENTS

Les phénomènes expliquant l'évolution des aliments au cours de leur conservation ont trois origines principales : le métabolisme des plantes ou des animaux, qui est régulé par des mécanismes essentiellement **enzymatiques** ; la croissance de micro-organismes ; des phénomènes physiques ou chimiques, dont certains peuvent persister au froid ou dans des milieux secs.

### Évolutions liées au métabolisme des plantes ou des animaux

Les grains et les graines (dont les céréales) sont suffisamment secs pour ne pas évoluer après la récolte sous l'action des phénomènes liés au métabolisme des plantes. Dans le cas des fruits et légumes, les mécanismes enzymatiques sont les premiers à intervenir après la récolte, notamment quand ils font appel à des enzymes déjà présentes dans le produit. Ainsi, la respiration des fruits et des légumes persiste après leur récolte, ce qui est un phénomène majeur à prendre en compte pour leur conservation. Selon les conditions de stockage, les produits peuvent aussi se dessécher et flétrir. La respiration, qui consomme du dioxygène ( $O_2$ ), des sucres et des acides organiques, produit de l'énergie, du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et de l'eau. La ralentir est le moyen principal de prolonger la durée de vie des fruits et légumes après leur récolte, soit en diminuant leur température, tout en évitant les maladies liées au froid ou au gel, soit en réduisant la teneur en  $O_2$  de leur environnement. La maturation des fruits aboutit en fin de processus à leur **surmaturation** et **sénescence**. Cette surmaturation peut se déclencher plus (légumes feuilles, tel l'épinard) ou moins (certains légumes racines, comme les carottes) rapidement. La maturation des fruits et légumes dits « climactériques » (pommes, bananes, tomates, etc.) dépend de la production d'éthylène, une hormone végétale. L'éthylène libéré par le végétal stimule sa propre production, y compris dans les fruits voisins. Cela explique pourquoi mettre des pommes en contact avec d'autres fruits en stimule le « mûrissement ». Il est important de limiter les phénomènes de sénescence, au cours desquels la mort cellulaire s'accompagne d'un ramollissement dû à la libération d'enzymes qui dégradent la paroi végétale,

rendant ces produits encore plus susceptibles d'être dégradés par les micro-organismes. D'autres enzymes présentes dans l'aliment déclenchent des altérations après une blessure ou une rupture du fruit ou du légume. Celles-ci mettent en contact des enzymes et leurs substrats, séparés initialement dans le fruit ou le légume sain. Les plus significatives agissent sur l'oxydation des lipides, et sont responsables de la formation d'arômes souvent qualifiés de «verts», ou sur l'oxydation de **polyphénols** et autres composés végétaux, et entraînent le brunissement enzymatique des produits découpés. L'inactivation de ces enzymes explique la nécessité du chauffage préalable, appelé «blanchiment», des fruits et légumes surgelés. En effet, ces enzymes restent actives, même faiblement, au cours du stockage réfrigéré, contribuant à un faux goût décrit comme «de carton» pour certains légumes surgelés.

En ce qui concerne les aliments issus de la chair animale, les muscles se trouvent privés d' $O_2$  du fait de l'arrêt de la circulation sanguine après l'abattage de la bête. Le cycle énergétique qui, du vivant de l'animal, était assuré par la respiration, ralentit puis s'arrête. Le stock énergétique du muscle diminue. Le fonctionnement biochimique de la cellule vivante change progressivement pour conduire à la formation d'acide lactique et à l'installation de la rigidité cadavérique par contraction du muscle. La vitesse et l'amplitude de l'acidification vont dépendre de la température ambiante et du niveau des réserves énergétiques au moment de la mort de l'animal. Après l'installation de la rigidité cadavérique, les enzymes contenues dans le muscle commencent à «dissocier» les fibres musculaires responsables de la contraction, ce qui conduit à son relâchement. Cette phase de maturation a un effet prépondérant sur la tendreté des viandes et, dans une moindre mesure, sur leur jutosité. La maturation est primordiale pour la tendreté des viandes issues de certaines espèces animales comme les bovins et certains gibiers, ce qui nécessite de bien contrôler la température de conservation des carcasses afin de ne pas bloquer son déroulement. La structure et le métabolisme du muscle sont différents chez les poissons, et l'évolution *post-mortem* du muscle est rapide. Il n'y a donc pas de problème de tendreté et les poissons sont dans la plupart des cas congelés ou immergés dans de la glace immédiatement après la pêche pour bloquer les

autres phénomènes de dégradation. En effet, les **acides aminés** libérés par l'action des enzymes présentes chez l'animal peuvent être dégradés et convertis par les micro-organismes présents en **amines biogènes** malodorantes (putrescine, cadavérine), signalant ainsi leur perte de fraîcheur. Les bactéries peuvent également transformer un acide aminé, l'histidine, en histamine, générant ainsi des réactions allergiques, comme dans le cas du thon lorsqu'il est mal conservé.

### Évolutions liées à la croissance de parasites ou de micro-organismes

L'animal d'élevage ou sauvage peut, de son vivant, héberger des parasites qui vont subsister après sa mort. Cela est rare pour les animaux d'élevage européens, qui sont contrôlés par les services vétérinaires, mais peut exister chez les animaux sauvages. Les animaux comme les végétaux sont aussi exposés aux micro-organismes présents dans l'air ou le sol, et donc contaminés en surface ; certains de ces micro-organismes sont présents sous des formes dites « sporulées », particulièrement résistantes. La congélation du produit frais peut détruire certains parasites mais n'a pas ou peu d'effet, ni sur les bactéries, ni sur les champignons, ni sur les virus. De plus, de nombreuses denrées alimentaires sont des milieux extrêmement favorables à la croissance des micro-organismes, bactéries, levures ou champignons filamenteux du fait de la présence d'eau et de nutriments. Cette croissance peut rendre les aliments impropre à la consommation, voire néfastes pour la santé, mais aussi conduire à de nouveaux aliments par un processus maîtrisé de fermentation. La croissance ou, au contraire, l'inactivation des micro-organismes dépendent de la disponibilité en eau, déterminée par l'activité de l'eau, de la température et de l'acidité. De manière générale, la conservation est d'autant plus longue que la température et l'activité de l'eau sont faibles, car la croissance des micro-organismes est ralentie par ces conditions.

Il convient de distinguer les bactéries pathogènes, qui sont nocives pour la santé humaine, des bactéries d'altération, qui ne font que dégrader le produit. Il est important de connaître l'origine de ces bactéries et les conditions favorables à leur croissance

ou à leur inactivation. Pour cela, la température, l'activité de l'eau, l'acidité du produit et la teneur en O<sub>2</sub> doivent être prises en compte. Les micro-organismes sont généralement classés en fonction de leur besoin et de leur tolérance à la température et à l'O<sub>2</sub>. Les micro-organismes aérobies ne se développent qu'en présence d'O<sub>2</sub> et produisent leur énergie par respiration ; ils ne pourront se développer qu'en surface des aliments. D'autres, dits « anaérobies », sont capables d'utiliser des voies métaboliques fermentaires, donc de se multiplier en l'absence d'O<sub>2</sub>. Certains d'entre eux sont anaérobies stricts, car dépourvus d'enzymes capables de dégrader les radicaux provenant de l'O<sub>2</sub> (*Clostridium botulinum* par exemple). D'autres, tout en dépendant uniquement de voies fermentaires, peuvent tolérer plus ou moins l'O<sub>2</sub> (microaérophiles, comme les bactéries lactiques ou aérotolérants). Enfin, certains sont aéro-anaérobies, c'est-à-dire capables, selon les conditions, d'utiliser soit les voies respiratoires, soit les voies fermentaires. Un facteur déterminant pour les procédés de conservation est que les bactéries pathogènes, ou productrices de toxines, ne se développent pas en milieu acide.

Le plus souvent, les micro-organismes sont localisés dans des parties spécifiques de l'anatomie des végétaux ou des animaux sains. Lorsqu'un animal sain est vivant, les muscles sont stériles, et les bactéries sont localisées sur sa peau et dans ses cavités orales, nasales ou digestives. Ce n'est plus totalement le cas en sortie d'abattage,

### LA NOTION D'« ACTIVITÉ DE L'EAU » (AW)

L'activité de l'eau d'un produit quantifie la disponibilité de son eau à participer à des réactions (bio)chimiques ou au développement d'organismes vivants (comme les micro-organismes). Elle varie entre 1 (ou 100 %) lorsque l'eau est complètement disponible, et 0 lorsque l'eau est totalement liée au produit. Elle est fonction de la température et se mesure en mettant le produit en équilibre avec un gaz environnant dont la teneur en eau a été fixée. Elle dépend de la quantité d'eau, mais aussi de la composition et de la structure du produit. Diminuer l'activité de l'eau dans les produits alimentaires peut ralentir, voire stopper, les réactions ou la croissance des micro-organismes susceptibles de les dégrader.

puisque la surface des muscles a pu être contaminée à partir de la peau de l'animal ou lors de l'enlèvement des viscères. Cette contamination de surface va ensuite se propager vers l'intérieur de la viande au cours des découpes successives, entraînant un danger microbiologique potentiel et limitant la durée de vie du produit. Les produits les plus sensibles du point de vue microbiologique sont les viandes broyées, comme les steaks hachés, dans lesquelles la propagation des micro-organismes de la surface vers l'intérieur du produit est maximale. Il est intéressant de noter que la plupart des bactéries pathogènes situées sur des végétaux ont une origine animale. Ces bactéries sont dangereuses, car elles sont les plus adaptées à notre physiologie, et donc les plus susceptibles de nous contaminer et d'avoir un effet sur notre santé.

Les bactéries ne sont pas les seuls micro-organismes qui posent des problèmes pour la santé humaine. Les champignons qui se développent sur les produits végétaux dans des conditions chaudes et humides peuvent être particulièrement dangereux, par l'intermédiaire de certains de leurs **métabolites** secondaires, dénommés **mycotoxines**, qui sont de petites molécules souvent résistantes aux traitements thermiques. Il en est ainsi des champignons du groupe Fusarium, qui peuvent être présents sur les grains de céréales et de maïs. Le blé dur, destiné aux industries de la semoulerie et des pâtes alimentaires, est particulièrement sensible à ces fusarioSES, susceptibles de mener à la présence de diverses mycotoxines. D'autres champignons sont responsables de la synthèse de mycotoxines, que ce soit dans les grains et graines ou dans les fruits et leurs produits. Or, les mycotoxines peuvent, à certaines concentrations, être dangereuses pour la santé des consommateurs. Elles possèdent en effet une toxicité aiguë variable, avec des conséquences à long terme comme l'induction de cancer, des modifications de l'ADN ou des effets sur le développement du fœtus. À forte dose, leurs impacts sont très délétères sur différents organes vitaux (foie, reins, systèmes nerveux ou immunitaire, etc.). Les mycotoxines peuvent aussi avoir des effets sur notre système nerveux central, comme les alcaloïdes de l'ergot de seigle (*Claviceps purpurea*). La dernière toxi-infection collective liée à l'ergot de seigle en France, survenue en 1951 à Pont-Saint-Esprit, a causé sept morts, des dizaines

d'hospitalisés et plusieurs centaines de personnes atteintes. L'Union européenne a d'ailleurs établi des concentrations maximales en mycotoxines autorisées, que ce soit en alimentation humaine ou animale.

Enfin, certains aliments peuvent héberger des parasites ; peu fréquents, ils sont cependant particulièrement nocifs, car il y a peu de solutions thérapeutiques pour les éliminer. La trichinose est ainsi systématiquement recherchée dans les carcasses de porcs et elle est à l'origine de la recommandation classique de ne le manger que bien cuit. De même, l'anisakiase explique la nécessité de congeler le poisson cru avant toute utilisation (sushis) ; l'échinoccocose, la recommandation d'éviter la consommation à l'état cru des petits fruits sauvages dans l'est de la France ; la cryptosporidiose, les consignes de nettoyage des légumes, notamment après fertilisation par du fumier. Les parasitoses dues à des parasites unicellulaires sont émergentes et sont en lien avec la consommation de légumes ou fruits consommés crus ou peu cuits. En effet, ces parasites ne sont pas inactivés par les agents couramment utilisés pour traiter les eaux potables et peuvent résister à la congélation ou aux méthodes de séchage à basse température.

Les virus du tube digestif (principalement norovirus, rotavirus et hépatite A) sont une cause majeure de gastro-entérites, généralement bénignes, mais pouvant être mortelles pour les personnes immunodéprimées, les jeunes enfants et les personnes âgées. Ils sont dépendants de l'homme pour leur multiplication et leur diffusion (contamination fécale), et ne peuvent pas croître dans les aliments. Les virus responsables de toxi-infections alimentaires sont relativement persistants dans l'environnement au sens large, y compris dans les ateliers de préparation des aliments, les cuisines ou sur les mains humaines. Les plus fréquents sont les norovirus, hautement contagieux et facilement disséminés dans des collectivités telles que les maisons de retraite. Ils sont résistants à la congélation, mais assez facilement inactivés par les traitements thermiques.

## Évolutions liées à des phénomènes chimiques

Les phénomènes chimiques ou physiques sont généralement plus lents et moins dangereux que ceux liés aux enzymes ou aux micro-organismes, mais peuvent conduire à des altérations marquées du produit.

Les réactions d'oxydation peuvent concerner les lipides, les protéines et, chez les végétaux, les polyphénols. Ces réactions sont une cause majeure de la dégradation des produits alimentaires au cours de leur conservation, d'autant plus qu'elles peuvent se poursuivre pendant des stockages à très basses températures, comme dans le cas des produits congelés. Les produits les plus sensibles à l'oxydation sont ceux qui sont riches en acides gras insaturés ou en ions métalliques susceptibles de catalyser les réactions d'oxydation (ions de fer, de cuivre), et qui sont soumis à des concentrations en O<sub>2</sub> élevées et à la lumière. Au cours de la conservation, l'O<sub>2</sub> de l'atmosphère migre dans le produit. La migration est plus rapide pour les produits de petites dimensions et dans les liquides en mouvement que dans les solides. L'incorporation d'O<sub>2</sub> peut être particulièrement intense lors de la fabrication des émulsions ou lors du broyage et du hachage des produits solides. L'oxydation est une chaîne de réactions complexes qui comprend une phase d'initiation, de propagation, puis d'arrêt des réactions. L'oxydation des lipides ou des protéines peut faire varier la couleur et l'arôme du produit, modifier la digestibilité d'un aliment, ou conduire à la formation de composés malodorants, voire toxiques.

Parmi les mécanismes chimiques, les réactions d'oxydation décrites pour les polyphénols ou les lipides (voir *supra*) peuvent aussi avoir lieu en absence d'enzymes ; on parle alors d'auto-oxydation ou brunissement non enzymatique. L'initiation est déclenchée par d'autres catalyseurs (radicaux libres, lumière, sels métalliques), tandis que la phase de propagation se développe spontanément. Même si ces réactions conduisent en général à de « mauvais goûts », elles peuvent également être recherchées (de façon contrôlée), par exemple dans les vins jaunes. L'oxydation peut aussi avoir un effet important sur la couleur du produit, comme dans le cas des viandes, en particulier la viande de bœuf.

## Évolutions liées à des instabilités physiques

Certaines évolutions des aliments n'impliquent ni enzymes, ni micro-organismes, ni réactions chimiques, mais conduisent cependant à des défauts et rejets. C'est le cas, par exemple, du rassissement des produits céréaliers, de la séparation de phase des sauces émulsionnées (sauces salade), de la rétraction des gels comme les yaourts, de l'effondrement des mousses, de la recristallisation du sucre dans des sirops, etc. Ces instabilités physiques sont en général plus lentes que les phénomènes biologiques et conduisent à des altérations et des pertes de qualité, mais sans risque particulier pour la santé des consommateurs.

Certains aliments sont physiquement instables. C'est le cas, en particulier, de ceux que les physiciens de la matière molle appellent des systèmes dispersés : émulsions, mousses, mais aussi suspensions ou poudres. En effet, ces systèmes comportent deux (ou plus) phases non miscibles : les émulsions sont des mélanges de liquides non miscibles, les mousses de gaz et de liquide, et les suspensions de particules et de liquides. Émulsions, mousses ou suspensions peuvent devenir complexes. Ainsi, une crème glacée est une mousse formée à partir d'une émulsion dans laquelle se sont formés des cristaux de glace. Ces produits sont fréquents : le lait, la crème, mais aussi les sauces salade, la mayonnaise, la moutarde, le ketchup ou les purées de fruits sont des systèmes dispersés. Ces systèmes ont spontanément tendance à reformer des phases séparées sous l'action de deux mécanismes principaux. D'une part, une migration sous l'effet de la gravité, qu'il s'agisse de crémage (phase dispersée plus légère, qui migre vers le haut) ou de sédimentation (phase dispersée plus lourde, qui migre vers le bas). D'autre part, une diminution de l'aire de contact entre les phases aboutissant à des particules ou à des gouttelettes plus grosses.

Pour les mousses, le phénomène est plus complexe, avec au cours du temps un amincissement des parois entre bulles qui les fragilise, conduisant à une possible fusion. Un deuxième phénomène conduit à une augmentation moyenne des tailles de bulles, sous l'effet des différences de pression, qui entraînent une migration du gaz des petites bulles vers les plus grosses.

Dans les produits céréaliers, la recristallisation de l'amidon (**rétrogradation**) conduit à des textures de plus en plus dures et diminue sa digestibilité. L'amidon est la forme de stockage d'énergie des plantes, où il se présente sous forme semi-cristalline dans des grains d'amidon compacts. Quand ces grains d'amidon sont chauffés en présence d'eau, ils s'hydratent, gonflent, puis perdent leur cristallinité et libèrent leurs polymères. C'est la gélatinisation, qui conduit à des solutions visqueuses, comme lors de la préparation d'une sauce blanche. Lors du refroidissement, cette solution va devenir plus épaisse, puis former un gel. Au cours du temps, ce gel devient plus solide : c'est la rétrogradation de l'amidon, qui se traduit par le rassissement du pain, avec un passage de produits « moelleux » à des produits ayant une mie de plus en plus dure et cassante. Ce phénomène est accéléré quand la température baisse : stocker pain et viennoiseries au réfrigérateur n'est donc pas une bonne idée pour leur conservation.

Les matières grasses sont aussi sujettes à des changements de texture liés à des phénomènes physiques de cristallisation ou de fonte des cristaux de graisses, comme ceux du beurre en été. Ces évolutions sont complexes, notamment car les huiles et les graisses sont des mélanges de triglycérides comportant des acides gras de longueur et de degré d'insaturation variés, qui ont donc des comportements différents. Les changements de phase des lipides au cours de la conservation se traduisent par deux phénomènes : l'un réversible (apparition de particules dans les huiles stockées à des températures basses, typiquement huile d'olive en dessous de 16 °C), l'autre non réversible, qui est le blanchiment gras du chocolat. Dans les chocolats fourrés, il peut, de plus, se produire une migration des graisses à partir du fourrage. Le blanchiment du chocolat peut aussi être dû à la formation de fins cristaux de sucre en surface (blanchiment sucré), en lien avec des conditions de stockage trop humides ou des changements de température (froid vers chaud et condensation de surface), qui permettent l'absorption ou la condensation d'eau et la dissolution des sucres, recristallisant en surface.

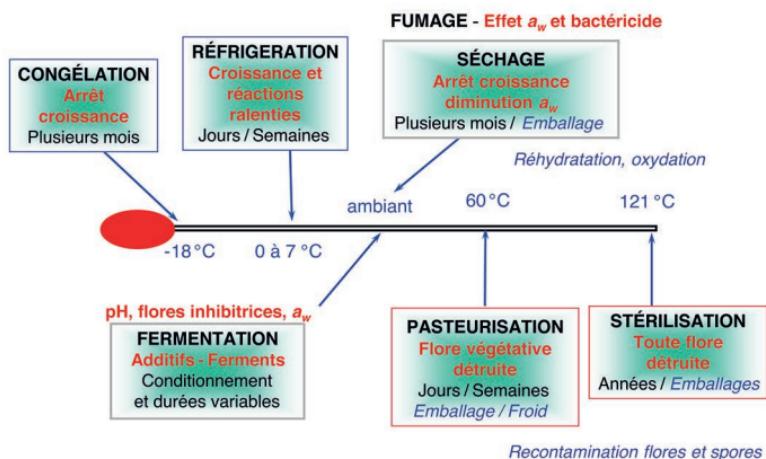
Enfin, les poudres alimentaires, notamment les poudres fines (farine, sel, sucre glace, etc.), sont sujettes au phénomène dit « de mottage » : elles ont tendance à former des agglomérats, perçus

comme un signe de non-qualité. Ces agglomérats sont dus à des phénomènes de migration de l'eau, qui rendent la surface des particules plus collante et conduisent à leur adhésion. Cela diminue leurs aptitudes à se disperser et à s'écouler, et peut favoriser des dégradations enzymatiques locales, l'oxydation des lipides, voire la croissance de micro-organismes, qui diminuent ainsi la qualité du produit.

## DÉVELOPPEMENT DES PROCÉDÉS DE CONSERVATION AU COURS DE L'HISTOIRE

### Principaux leviers utilisés dans les procédés traditionnels de conservation

La figure 1 présente les principaux types de procédés traditionnels de conservation en fonction de la température utilisée. La plupart des procédés traditionnels jouent sur la température, l'activité de l'eau, l'acidité et la teneur en  $O_2$  pour ralentir les réactions de dégradation et ainsi stabiliser au mieux le produit.



**Figure 1.** Température et principaux procédés traditionnels de conservation.

Dans chaque panneau sont mentionnés le type de procédé, l'effet recherché sur la contamination microbienne initiale (en rouge), les durées prévisibles de conservation (en noir) et les conditions de conservation (en italiques bleues). Source : figure d'Alain Kondkoyan.

Le froid stabilise les aliments en ralentissant la croissance des micro-organismes et en diminuant l'activité des enzymes présentes dans le produit. La congélation permet de conserver les produits sur de longues durées en conjuguant ralentissement des réactions biochimiques et diminution de l'activité de l'eau de par sa cristallisation sous forme de glace.

Un produit alimentaire est dit « frais » lorsqu'il a été récolté depuis peu de temps et conservé en l'état. Un produit réfrigéré est conservé à des températures souvent comprises entre 0 et 8 °C. La congélation peut changer la structure et la texture du produit, mais a peu d'effet sur sa valeur nutritionnelle. Le terme « surgelé » est employé pour des produits congelés très rapidement. Ils pourront être conservés à une température inférieure à – 18 °C pendant plusieurs mois jusqu'à une date de durabilité minimale (DDM, anciennement DLUO pour date limite d'utilisation optimale). Les micro-organismes ne sont pas éliminés par la congélation et les enzymes ne sont pas toutes inactivées. Certaines réactions, comme l'oxydation, se poursuivent à faible vitesse dans les aliments congelés et sont favorisées par des remontées de température en cours de stockage. La cuisson seule ne permet pas de conserver les produits alimentaires, soit parce que tous les micro-organismes n'ont pas été éliminés par le chauffage, soit en raison de recontaminations microbiennes venant du milieu ambiant. C'est pourquoi les aliments cuits sont le plus souvent conservés au froid et/ou dans un emballage qui les protège de la contamination extérieure.

De nombreux procédés de conservation visent à diminuer l'activité de l'eau, soit par son évaporation (séchage), sa cristallisation (congélation), par l'ajout de sel ou de sucres qui vont la capter (salage, confisage), soit par des combinaisons de ces effets.

Le séchage traditionnel, par l'air chaud et/ou les rayons du soleil, reste très utilisé. À l'échelle industrielle, la température de séchage et les caractéristiques de l'écoulement d'air doivent être soigneusement choisies et contrôlées pour accélérer la perte d'eau tout en limitant le développement de réactions chimiques indésirables, ou, au contraire, pour permettre des réactions souhaitées. Les séchages à faible température (< 70 °C) ne permettent pas