



ENJEUX SCIENCES

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. Goulletquer, 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 PDF : 978-2-7592-4078-4

ISBN epub : 978-2-7592-4079-1

ISSN : 2267-3032

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

www.quae.com

www.quae-open.com



Sommaire

Introduction	5
Pourquoi et comment conserve-t-on traditionnellement les aliments?	7
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?	30
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 »?	40
Stabilité microbiologique du produit	42
Stabilité de la texture du produit	52
Fermentation et biopréservation : comment associer durabilité et naturalité?	55
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?	75
Optimiser la chaleur dans la stérilisation et la pasteurisation	76
Peut-on aller vers un froid plus durable ?	88



Décontamination athermique et technologies barrières: une association plus durable et plus sûre?	102
Présentation des technologies athermiques	103
Intérêts et limites des technologies athermiques	107
Le concept de technologies barrières	109
Quel rôle pour les emballages?	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
La conservation au cœur de la transition alimentaire?	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
Conclusion	149
Annexe	152
Glossaire	157
Bibliographie	165
Liste des auteurs	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^e et XX^e 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**¹), 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'O₂ 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 impropres 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_2 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_2 . Les micro-organismes aérobies ne se développent qu'en présence d' O_2 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_2 . Certains d'entre eux sont anaérobies stricts, car dépourvus d'enzymes capables de dégrader les radicaux provenant de l' O_2 (*Clostridium botulinum* par exemple). D'autres, tout en dépendant uniquement de voies fermentaires, peuvent tolérer plus ou moins l' O_2 (microaérophiles, comme les bactéries lactiques ou aéro-tolérants). 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'échinococcose, 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_2 élevées et à la lumière. Au cours de la conservation, l' O_2 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_2 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.

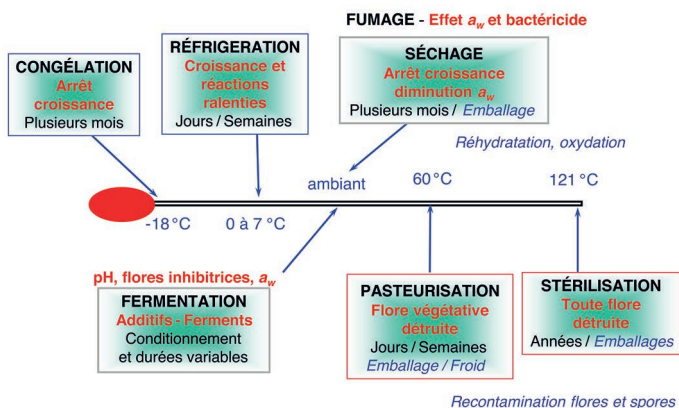


Figure 1. Température et principaux procédés traditionnels de conservation.

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

toujours l'élimination des micro-organismes et des parasites, et encore moins des spores, ce qui peut présenter un risque lorsque le produit est ensuite réhydraté. À température élevée, le séchage devient torréfaction, participant au développement de l'arôme du produit, mais pouvant conduire à la formation de composés toxiques.

Salage et confisage reposent sur des composés hydrosolubles qui font baisser l'activité de l'eau en « captant » l'eau libre. Des teneurs en sel de 50 à 60 grammes par kilogramme (g/kg) d'eau permettent de diminuer l'activité de l'eau jusqu'à 0,95 environ et de conserver les produits plus longtemps au froid. En revanche, il faut des teneurs en sel de 90 à 140 g/kg d'eau pour atteindre une activité de l'eau de l'ordre de 0,91, ce qui permet de se passer du froid. Les produits sucrés, comme les confitures ou les gelées, peuvent être stables à température ambiante si elles atteignent une teneur en sucres de l'ordre de 600 g/kg. La déshydratation osmotique, qui consiste à plonger le produit solide dans une solution à très forte concentration en sel ou en sucre, permet de faire sortir l'eau du produit et d'y faire entrer simultanément le sel ou le sucre.

Un milieu acide (conventionnellement la limite est fixée à pH 4,5) inhibe la croissance des bactéries pathogènes et diminue fortement les capacités de croissance de nombreuses autres espèces. C'est une solution simple et largement exploitée dans les procédés traditionnels. Un aliment peut être acidifié soit par des moyens chimiques, c'est-à-dire l'addition d'acides faibles comme l'acide acétique (vinaigre), l'acide lactique, etc., soit par fermentation.

La fermentation est un procédé ancestral de conservation et transformation des aliments. Des micro-organismes naturellement présents ou ajoutés intentionnellement sont utilisés pour la fabrication d'aliments fermentés. La fermentation induit des modifications physico-chimiques (baisse du pH et du potentiel d'oxydo-réduction) ou l'épuisement de certains substrats qui peuvent inhiber d'autres flores non désirées. La fermentation peut également améliorer la digestibilité des protéines ou réduire certains facteurs antinutritionnels. Cela explique la part fondamentale des aliments fermentés dans l'alimentation. Il s'agit en

général, en Europe, de fermentations lactiques (produits laitiers, saucisson, choucroute et autres légumes fermentés), alcoolique (vin, bière, cidre) ou acétique (vinaigre). La panification résulte d'une fermentation par de la levure (typiquement *Saccharomyces cerevisiae*) ou un levain complexe incluant des bactéries lactiques. Des moisissures interviennent également dans la production de certains fromages, mais aussi, en Asie, dans la production de sauce soja, de *miso*, ou de *tempeh* (voir « Les aliments fermentés »). Les fermentations alimentaires sont rarement le fait d'une souche pure de micro-organisme. Elles impliquent généralement des successions fermentaires et des écosystèmes complexes.

Les traitements thermiques sont utilisés pour cuire, mais aussi pour conserver les aliments, en inactivant les micro-organismes et les enzymes **endogènes** (figure 1). Les aliments cuits étant sensibles aux recontaminations microbiennes, le traitement thermique doit être accompagné d'un emballage étanche pour assurer la conservation. Deux niveaux sont couramment distingués : la **pasteurisation**, qui détruit les **formes végétatives** des micro-organismes, et la **stérilisation**, qui détruit tous les micro-organismes, y compris leurs spores. Les aliments pasteurisés (sauf s'ils sont acides) devront être conservés au froid, avec des durées de vie de l'ordre de quelques semaines. La stérilisation couplée à un emballage étanche (**appertisation**) permet des stockages de longue durée à température ambiante. Ces traitements sont quantifiés par la notion de « réduction logarithmique », qui est une division par 10 du nombre de micro-organismes présents. Une réduction de 2 log est ainsi une division par 100, 3 log par 1 000, etc. Des niveaux minimaux de réduction à atteindre pour des bactéries pathogènes (par exemple *Clostridium botulinum*) sont définis afin de cadrer l'intensité du traitement et assurer la sécurité du produit. Ce concept sera développé dans la partie « Optimiser la chaleur dans la stérilisation et la pasteurisation ».

Les méthodes de conservation reposent également sur l'utilisation des emballages, qui peuvent soit jouer un rôle direct, soit constituer un élément technique associé à un procédé de conservation. L'emballage contribue à préserver les qualités du produit en agissant comme une barrière : les produits sensibles à l'oxydation requièrent des emballages ayant des **fonctionnalités**

barrières à l'O₂, les produits secs nécessitent des emballages barrières à la vapeur d'eau, la rétention des arômes est assurée quant à elle par des emballages présentant de faibles niveaux de perméabilité aux composants volatils organiques. L'emballage est un partenaire clé des voies technologiques de stabilisation microbiologique des produits alimentaires. Les vitesses de (sur) maturation des fruits et légumes crus sont modulables en fonction des propriétés de perméabilité à l'O₂ (entrant dans l'emballage au contact du produit) et au CO₂ (sortant) des emballages dits « respirants ». Les atmosphères modifiées, composées de mélanges de CO₂ et d'azote (N₂) introduits au contact du produit en substitut de l'air, permettent de limiter le développement des micro-organismes. Le maintien de ces compositions gazeuses au cours de la durée de vie du produit nécessite des emballages sophistiqués présentant des barrières spécifiques aux gaz. De plus, les produits pasteurisés ou stérilisés dans l'emballage requièrent l'utilisation de matériaux résistants aux températures de traitement.

Outre la conservation du produit, l'emballage préserve l'intégrité des aliments conditionnés. Le produit emballé est soumis à des contraintes mécaniques de natures très diverses (poinçonnement, compression lors de la palettisation, chute) et à des conditions d'humidité et de température variables. L'emballage permet également à l'industriel et au distributeur d'interagir avec le consommateur. Au-delà de ses fonctions marketing, c'est un vecteur d'informations sur la nature, la composition et les caractéristiques du produit ; c'est aussi un outil pratique de manipulation, de dosage, de préparation et de consommation du produit.

Les procédés de conservation doivent donc être réfléchis d'une façon holistique, en prenant en compte plusieurs éléments (tableau 1). Le praticien pourra choisir une combinaison entre produit, procédé et emballage, en fonction de plusieurs critères : la matière première à conserver, sa nature et sa vulnérabilité (teneur en eau, mais aussi pH) ; la durée de conservation souhaitée ; les modes de stockage disponibles (ou souhaités) ; et enfin, l'utilisation alimentaire souhaitée. Ces critères permettent de définir des options interdépendantes qui peuvent être formalisées, comme

Tableau 1. Conditions d'emballage et de conservation appliquées classiquement en fonction du type de produit et du traitement préalable.

Traitement	Conditions	Emballage	Durée	Remarques
Fruits et légumes « frais » (« première gamme »)	Froid positif, contrôle de l'atmosphère	Protection mécanique, respirant	Quelques jours (épinards) à quelques mois en atmosphère contrôlée (pommes)	Froid et atmosphère contrôlée utilisés pour le transport et pour étaler la commercialisation de produits récoltés sur une période limitée, ou pour le stockage longue durée de produits « de base » comme les pommes, les pommes de terre, les poires, les agrumes... Optimum de température et composition de l'atmosphère dépendent du fruit ou du légume.
Fruits et légumes « frais découpés » (« première gamme améliorée », « quatrième gamme »)	Froid positif, contrôle de l'atmosphère	Semi-perméable, assure la mise en place ou le maintien d'une atmosphère appauvrie en O ₂	Quelques jours	Produits préparés pour une commercialisation rapide.
Surgelés (légumes « troisième gamme » et produits animaux)	Froid négatif	Protection mécanique, limite la déshydratation	Quelques mois	Un blanchiment à température modérée est souvent recommandé pour inactiver les enzymes endogènes des fruits et légumes ou pour éviter une forte dégradation de la qualité lors de la décongélation, notamment pour les légumes. Viande hachée limitée par la décoloration liée à l'oxydation de la myoglobine.
Jus, purées, compotes, et légumes (« cinquième gamme »)	Froid positif ou ambiant	Étanche	Quelques mois	Produits pasteurisés ou pascalisés (« pasteurisation à froid »), dont les conditions de conservation dépendent du pH initial. Les légumes lacto-fermentés sont souvent commercialisés après une pasteurisation légère.

Fruits secs ou séchés	Température ambiante, au sec	Protection mécanique, contrôle de l'humidité, limite insectes et moisissures	Quelques mois à années	Pas de risque microbiologique, mais détérioration des qualités organoleptiques.
Poulets éviscérés	- 2 °C à 4 °C	Film perméable à l'O ₂	7 jours environ à 4 °C à plus de 20 jours à - 2 °C	Risques liés à la contamination lors du plumage et de l'éviscération des carcasses.
Portion de bœuf tranchée	4 °C	Film perméable à l'O ₂	1 à 4 jours	Dépend de la contamination initiale de la carcasse et des conditions de découpe.
Charcuterie tranchée	4 °C	Sous vide	3 à 6 jours	Dépend du traitement initial (teneur en sel et conditions de cuisson) et des recontaminations au tranchage.
Portion de bœuf découpée	4 °C	Sous vide	14 jours	Souvent utilisée pour conserver des blocs de muscles avant tranchage. Conduit à une couleur rouge foncé de la viande.
Portion de bœuf tranchée ou d'abats	2 °C	Atmosphère modifiée (par exemple 80 % O ₂ , 20 % CO ₂)	9-12 jours	Limitée par la microbiologie, mais aussi par l'oxydation et la décoloration des viandes ou abats.
Conserves appertisées légumes, viandes, pâtés...	Température ambiante	Étanche (empêche toute recontamination microbienne)	Au moins un an	La durée de stabilité dépend de l'inertie chimique de la surface interne des boîtes ou bocaux.

En froid positif, les viandes fraîches sont conservées dans des chambres froides entre - 1 °C et 4 °C, tandis que les fruits sont conservés entre - 1 °C et 15 °C en fonction de l'espèce et de la maturité du fruit. Les réfrigérateurs domestiques doivent être réglés pour que leur température moyenne soit autour de 4 °C, avec des zones spécifiques à température plus faible ou plus élevée en fonction du type de produit à conserver (viandes ou poissons, bac à légumes...).



c'est le cas pour les fruits et légumes, en différentes gammes résumant les choix possibles pour le praticien (tableau 1). Le terme de « première gamme » désigne les fruits et légumes « frais », qu'ils aient été ou non stockés. La « deuxième gamme » désigne les fruits et légumes en conserve, dits « appertisés », la « troisième gamme » les produits surgelés et la « quatrième gamme » les produits « frais découpés », dont les blessures diminuent la durée de vie par rapport au produit récolté. La « cinquième gamme » désigne des produits végétaux cuits (mais non stérilisés), emballés sous vide (marrons, betteraves, etc.) et commercialisés au rayon frais. Une bonne illustration de l'importance de prendre en compte les modalités de stockage disponibles est celle des poissons séchés et salés (morue, saumon, harengs, etc.). Pouvoir les conserver au froid plutôt qu'à température ambiante a permis de diminuer de façon significative le degré de séchage et/ou la teneur en sel finale de ces produits. Cela présente l'avantage, d'une part, de diminuer les apports en sodium, et d'autre part, d'avoir des produits moins « durs » nécessitant moins, voire plus du tout, d'étape de dessalage.

Bref historique des procédés de conservation

Les principes de la plupart des procédés de conservation des aliments ont été établis très tôt dans l'histoire de l'humanité. Il s'agissait de découvertes empiriques particulièrement ingénieuses, qui restent le fondement de la majorité des procédés encore utilisés de nos jours. Ce que nous savons des développements les plus anciens reste limité par la présence de traces matérielles exploitables par les archéologues, même si les observations ethnologiques peuvent suggérer l'existence d'autres pratiques utilisant des matériaux plus fugaces.

L'utilisation du feu, connu depuis plus d'un million d'années et maîtrisé depuis plus de 400 000 ans, rend les aliments à la fois plus sûrs et plus digestes. Il peut donc être considéré comme l'un des premiers procédés de conservation, bien que la cuisson soit essentiellement un assainissement et non un mode de conservation. Il est très probable que nos ancêtres aient su conserver les aliments par le froid, mais cette méthode laisse peu de traces archéologiques. Les Mésopotamiens, mais aussi les Grecs et les

Romains, utilisaient de la glace stockée pour conserver la viande l'été ou pour rafraîchir des boissons. En Europe, les glaciers pouvaient héberger des centaines de tonnes de glace dans des fosses souterraines.

Les premiers procédés de stabilisation au sens strict sont le séchage (soleil, vent) et le fumage (séchage utilisant du feu), utilisés avant même le Néolithique. Ils peuvent donner lieu à des préparations complexes, par exemple du type « pemmican », qui combine viande séchée et broyée, graisses animales et baies séchées. Avec le Néolithique et la sédentarisation, apparaissent les procédés de stockage (silos) et de transformation (meules) des céréales et légumineuses, dont les grains et graines ont l'avantage de pouvoir se conserver relativement facilement du fait de leur faible teneur en eau. L'abondance des meules démontre que, dès – 9500 ans avant notre ère, grains et graines étaient broyés, au départ pour la production de bouillies ou de galettes, ouvrant la voie à des produits secs à longue conservation.

Les produits fermentés ont aussi connu des développements majeurs au Néolithique, car ils permettent une consommation différée tout en conférant aux boissons et aux aliments des propriétés sensorielles attractives. La fermentation a laissé des traces tangibles, utilisées par les archéologues pour attester de sa mise en œuvre : récipients, marqueurs chimiques de fermentation absorbés dans les parois poreuses des poteries, grains d'amidon et **phytolithes**. Les premières fermentations auraient visé les effets **psychoactifs** de l'alcool plutôt que la conservation des aliments. L'hydromel aurait été la première boisson alcoolisée, par fermentation spontanée du miel, riche en levures, suivi par des boissons intégrant fruits (porteurs de levures), miel et céréales, et enfin le vin « de raisin ». La bière aurait été produite avant même la domestication des céréales et l'invention de la poterie, comme le montrent à la fois des signes archéologiques et la génétique des levures. La fermentation comme principe de conservation des aliments est d'abord avérée pour des produits lactés ou carnés. Par exemple, l'homme a fait fermenter le lait dès qu'il a domestiqué les ruminants (bovins, ovins et caprins).

Les premiers indices de « pain », au sens d'un produit fermenté puis cuit, datent de l'Égypte ancienne (illustrations des tombes, restes d'offrandes). Les fermentations alcooliques ont aussi conduit à des productions de vinaigre, dont témoignent des restes présents dans des urnes égyptiennes. Des fermentations lactiques de végétaux (comme le concombre) sont mentionnées dans la Bible ou les textes babyloniens. Les produits carnés et les produits de la mer pouvaient aussi être fermentés, soit tels quels, soit pour des sauces à base de poisson (par exemple le *garum*). L'historique de la fermentation des produits carnés est moins documenté, mais elle existe au moins depuis le Moyen Âge, avec le développement des salaisons fermentées comme le saucisson sec. Plus généralement, le rôle du salage est démontré depuis le Néolithique par le développement de l'extraction du sel, dont on trouve des vestiges dès le VI^e millénaire avant notre ère à Lunca (Roumanie), et des traces archéologiques parfois impressionnantes (mines de Hallstatt, briquetage de la Seille en Moselle). L'utilisation de nitrates est attestée depuis l'Antiquité, en particulier mélangés sous forme de **salpêtre** au sel des salaisons.

L'ajout de sucres et de graisse pour produire des aliments confits est documenté dans les séquences archéologiques, voire dans les écrits antiques (graisse, miel et dattes...). Enfin, outre les composés apportés dans les fumées, les propriétés antibactériennes et antioxydantes des épices et des herbes étaient déjà mises en œuvre dans l'Antiquité : vins avec de la résine, bière avec des herbes, etc. De même, l'usage fréquent du soufre brûlé pour la désinfection des tonneaux, et par conséquent la présence de sulfites, est attesté depuis le Moyen Âge.

Les procédés de stabilisation des aliments vont ensuite peu évoluer jusqu'au XIX^e siècle, qui voit le développement de la microbiologie. Celle-ci va permettre de mieux comprendre les causes de la dégradation et de la dangerosité des aliments. Associée à des évolutions technologiques, elle a conduit à deux avancées majeures pour les procédés de conservation :

– tout d'abord, l'invention par Nicolas Appert des conserves par stérilisation dans un récipient hermétique (fin du XVIII^e siècle), rapidement industrialisées avec le développement des **autoclaves**,

conduisant à l'élimination des spores, ainsi que des boîtes en fer-blanc, brevetées par Pierre Durand en 1810 ;

– la révolution du froid ensuite, c'est-à-dire des aliments « frais », passant de la collecte de la glace en hiver (un commerce international au XIX^e siècle) à la détente de gaz frigorigènes. Une première machine à froid est installée par Charles Tellier dans l'usine de chocolat Menier en 1865, et, en 1876, se déroule le premier transport de viande congelée par bateau, de l'Amérique du Sud vers la France.

En parallèle, des améliorations technologiques rendent les procédés plus sûrs et efficaces : chauffage à double enveloppe (par exemple pour la distillation), évaporateurs à plusieurs effets, autoclaves, utilisation du vide, etc. L'amélioration des techniques de cuisson et de chauffage, ainsi que le développement de l'emballage ont permis un premier développement commercial d'aliments humides à longue durée de vie. C'est dans la seconde moitié du XIX^e siècle, avec l'essor des connaissances en chimie alimentaire, l'amélioration des procédés thermiques, l'intégration du vide ou l'association entre température et pression mécanique — comme dans l'extrusion — que se développent des produits comme les bouillons de viande concentrés, la poudre de cacao, le chocolat, ou les pâtes sèches. Le séchage sur rouleaux est breveté en 1902 et la production de lait en poudre commence en 1904 ; le **séchage** par pulvérisation de gouttelettes liquides dans de l'air chaud, dit « **par atomisation** », est également mis au point au tout début du XX^e siècle. Les avancées de l'industrie sucrière rendent abordables des produits tels que les confitures ou les pâtes de fruits. Enfin, les procédés de nettoyage gagnent également en efficacité avec l'introduction de l'eau de Javel.

Les années qui ont suivi la Deuxième Guerre mondiale ont vu, en Europe de l'Ouest, la démocratisation du réfrigérateur ménager, puis du congélateur, qui ont rendu la conservation par le froid accessible à tous les foyers. Cela a accompagné le développement de l'industrie de la surgélation, avec des ateliers installés au plus près des productions. Le développement des emballages s'est quant à lui accéléré avec l'apparition de la grande distribution. C'est la mise au point de l'emballage aseptique dans les années 1960 qui, en levant la contrainte de l'étanchéité avant

chauffage, a permis l'utilisation de traitements courts à haute température (lait « ultrahaute température », pasteurisation très rapide dite « **flash-pasteurisation** » des jus de fruits), et par conséquent une meilleure préservation des qualités nutritionnelles et sensorielles des aliments liquides pour une même sécurité sanitaire. Les décennies 1950 et 1960 ont vu l'essor des industries agroalimentaires, avec des opérations de transformation et de conservation dites de « première » (abattage, tri, lavage, découpe, etc.), de « deuxième » (séchage, cuisson, etc.) et de « troisième transformation » (assemblage). Leur élaboration est liée au développement du génie industriel alimentaire, dans lequel la transformation du produit est séquencée en une succession d'opérations dites « unitaires », classées selon les phénomènes physiques et chimiques mis en œuvre. Des alternatives aux méthodes traditionnelles de séchage ont été introduites dans l'usage industriel, comme le séchage par ébullition sur cylindres chauffants, utilisé pour la production de flocons, ou le séchage par atomisation pour produire des poudres à partir de différents liquides dont le lait. Enfin, la lyophilisation, qui consiste à congeler l'eau du produit, puis à la faire passer directement à l'état de vapeur, a été développée pour mieux préserver la structure et la composition des produits sensibles à la température.

Dans les années 1970, d'autres procédés de transformation-conservation ont été proposés. Ils ont donné lieu à des classifications fondées sur la nature du produit obtenu en lien avec ses qualités nutritionnelles et son mode de conservation (tableau 1). Ainsi, comme nous l'avons vu précédemment, les fruits et légumes peuvent être répartis en différentes gammes suivant le procédé appliqué, qui détermine aussi les modes de conservation. Ces procédés sont couplés à des modes de stockage différenciés. Les produits frais de « première » et « quatrième gamme » concernent des végétaux vivants et impliquent un contrôle de la température (basse, mais positive). La « troisième gamme » (produits surgelés) nécessite le respect de températures négatives. La « deuxième gamme » (appertisation) et les produits séchés, à faible activité de l'eau, s'affranchissent de cette nécessité.

Les années 1980, puis 1990, ont vu l'apparition dans les foyers des fours à micro-ondes, une technologie d'ailleurs plus difficile à

développer à l'échelle industrielle que domestique. De nouveaux procédés de conservation ont été proposés, tels que les très hautes pressions (pascalisation), le chauffage par circulation de courants électriques dans l'aliment (**chauffage ohmique**), l'exposition à de très courtes impulsions électriques (**champs électriques pulsés**) ou à des rayons ionisants émis par une source radioactive (**irradiation**). Certains de ces procédés ont du mal à franchir le seuil du laboratoire du fait de leur non-adoption, voire de leur rejet, par le consommateur, et en raison de la législation de l'Union européenne (directive 258/97/CE dite « novel foods »). Il est indispensable d'analyser en détail les raisons de cette défiance et de ces rejets pour pouvoir répondre aux nouveaux défis auxquels sont soumis les procédés de conservation (voir « La conservation au cœur de la transition alimentaire ? »). À la même époque, l'utilisation des matières plastiques issues de la transformation des ressources fossiles s'est largement développée, avec la mise au point d'emballages de masse au coût et à la performance particulièrement intéressants. L'évolution de la plasturgie a permis de combiner les matières plastiques et de les fonctionnaliser pour atteindre des performances de conservation aujourd'hui obtenues avec des épaisseurs d'emballages très largement diminuées. La diversité des fonctions de l'emballage en fait le partenaire incontournable dans la conservation des produits. La maîtrise des fonctionnalités barrières aux gaz a permis de développer les technologies de conservation sous atmosphère modifiée, qui diminuent le recours aux stabilisations thermiques. Deux évolutions majeures ont marqué la fin du ^{xx}e siècle et permettent de maîtriser une atmosphère de composition quasi constante au contact des produits : le développement des films plastiques barrières aux gaz et les progrès des technologies de scellage. Les problèmes d'étanchéité des emballages sont en effet souvent liés à des défauts au niveau des zones de fermeture, devenus rares malgré les cadences de conditionnement toujours plus rapides qui complexifient cette opération.



POURQUOI LES PROCÉDÉS DE CONSERVATION SONT-ILS REMIS EN QUESTION ?

Les consommateurs tiennent pour acquis les avancées des procédés et des industries agroalimentaires qui leur permettent d'avoir à disposition des aliments sûrs et sains, abordables et pratiques. Et, de fait, lorsqu'on leur demande ce qu'ils attendent des aliments, ils évoquent des produits naturels, frais, agréables à manger et durables. Mais concilier ces différentes dimensions n'est pas si simple, et de nombreuses idées reçues sur la durabilité, la naturalité et la transformation des aliments méritent d'être remises en perspective.

LES NOTIONS DE « DURABILITÉ » ET DE « NATURALITÉ »

Le terme de « durabilité » désigne une organisation de la société humaine qui lui permet d'assurer sa pérennité. La durabilité exige de préserver l'environnement, qui doit rester vivable pour les générations futures, tout en permettant un développement économique et social à l'échelle mondiale qui repose sur une organisation sociale équitable. L'évolution vers un monde plus durable a été formalisée par l'Organisation des Nations Unies (ONU) en dix-sept objectifs de développement. Notre analyse ne traitera pas des aspects de durabilité spécifiquement liés à la production agricole ou à l'élevage (rejet de méthane par les ruminants, absence d'OGM, d'allergènes, de pesticides, etc.), ni des liens entre systèmes agricoles et sécurité alimentaire, qui ont fait l'objet d'un autre ouvrage (Thomas *et al.*, 2022). La conception de nouveaux procédés de transformation-conservation, ou leur adaptation à des systèmes agricoles plus durables, font en revanche partie intégrante de notre propos (voir « La conservation au cœur de la transition alimentaire ? »).

DURABILITÉ ET OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les dix-sept objectifs de développement durable (ODD) recouvrent la lutte contre la faim et la pauvreté, ainsi que le droit à la santé, à un travail décent et à l'éducation. Ils promeuvent la paix et le partage des richesses, l'ouverture des espaces, l'égalité entre les genres et devant la justice. Ils placent la préservation de la planète parmi les objectifs de développement mondiaux.

Parmi ces ODD, certains concernent plus particulièrement la conservation des aliments : la sécurité alimentaire, l'accès à l'énergie et à l'eau, l'innovation et le développement de filières de production et de consommation alimentaires durables, la préservation des écosystèmes terrestres, et la lutte contre le réchauffement climatique. Le terme de « durabilité » s'y applique aux procédés de transformation-conservation, qui doivent préserver les ressources naturelles, en particulier en énergie et en eau, éviter les pertes et gaspillages d'aliments, n'entraîner aucune pollution, et limiter le rejet de gaz à effet de serre vers l'atmosphère. L'ODD sur la sécurité alimentaire implique, par exemple, que les procédés de transformation-conservation permettent à chacun de disposer d'aliments sûrs, bons pour la santé, et disponibles dans le temps et dans l'espace. Souvent, les consommateurs ne distinguent pas les différents maillons de la chaîne alimentaire et, pour eux, une transformation-conservation durable doit nécessairement être liée à un système agronomique et des filières durables.

Les consommateurs perçoivent la naturalité comme un attribut positif des aliments, guidés par trois motivations : la naturalité comme nourrissant le bien-être (en faisant appel à des registres physiques, émotionnels, psychologiques et sociaux) ; la naturalité comme un vecteur de transmission d'attributs positifs de la source au consommateur (« vous êtes ce que vous mangez ») ; et enfin, la naturalité connectée à l'authenticité, c'est-à-dire à la transparence et à la confiance (comme « fait à la maison »). Même si les notions d'aliment « naturel » et de « naturalité » n'ont pas de définition légale, tant au niveau de la réglementation européenne que dans le Codex Alimentarius (source des définitions pour les échanges commerciaux), elles revêtent une grande importance aux yeux du consommateur. En France, l'usage du

terme « naturalité » a donc été encadré par la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) en 2009. La première catégorie d'aliments définis comme naturels concerne les produits frais, les effets de la transformation mécanique (découpe, broyage, etc.) sur leur qualité étant supposés négligeables. La seconde recouvre la plupart des aliments issus des procédés utilisés classiquement dans l'industrie, y compris ceux liés aux traitements thermiques comme la **pasteurisation**, la **stérilisation**, la cuisson et la torréfaction. Cette définition vise surtout à réprimer les abus et les fraudes dans l'utilisation du mot « naturel » pour des produits de même origine et transformés de manière similaire. Elle ne peut être facilement reliée aux différentes dimensions de la qualité des aliments, en particulier sur les aspects sanitaires et nutritionnels. La définition de la « naturalité » est actuellement discutée au niveau européen, notamment dans le cadre de la mise en place des écolabels. Durabilité et naturalité sont souvent associées par le consommateur alors que ce sont deux notions distinctes. Dans son esprit, la transformation industrielle s'oppose souvent à la naturalité. Elle suscite donc l'inquiétude, voire le rejet.

DES CONSOMMATEURS SUSPICIEUX VIS-À-VIS DES ALIMENTS TRANSFORMÉS

L'aliment transformé industriellement est perçu comme « dégradé », comme ayant perdu le bénéfice nutritionnel du produit agricole initial, voire ayant subi des « manipulations » néfastes ou dangereuses pour la santé. Ce manque de confiance à l'égard des produits issus des industries agroalimentaires, qui n'est pas nouveau, a augmenté avec le temps, du fait d'une médiatisation régulière de « scandales » ou de « crises alimentaires », mêlant problèmes sanitaires et fraudes. Les types de fraude sont multiples et toutes ne sont pas dangereuses pour la santé du consommateur. En France et en Europe, les crises sanitaires d'origine biologique sont le plus souvent liées à la présence de bactéries pathogènes dans les aliments, même si des prions (encéphalopathie spongiforme bovine, dite « maladie de la vache folle », 1986) ou des virus (grippe aviaire de 2003-2006)

peuvent en être la cause. Les bactéries majoritairement en cause sont des salmonelles (lait infantile en 2023, chocolats en 2022), des *Escherichia coli* pathogènes (pizzas en 2022) et des *Listeria* (fromages en 2022). Les crises sanitaires liées à ces bactéries touchent le plus souvent les produits animaux, même si une souche d'*Escherichia coli* présente sur des graines germées a été à l'origine d'une trentaine de décès en Allemagne en 2011.

Mais la crainte relative aux méthodes de conservation des produits est plus directement liée aux crises sanitaires d'origine chimique, comme celle survenue en Chine en 2008, du fait de la présence frauduleuse de mélanine dans du lait en poudre pour nourrissons, ayant entraîné l'hospitalisation de trois cent mille bébés et au moins six décès. Cependant, les aliments « industriels » ne sont responsables que d'une part minime, bien que particulièrement visible, des 10 000 à 16 000 toxi-infections alimentaires collectives notifiées chaque année en France. La grande majorité est liée au non-respect des recommandations d'hygiène dans les foyers ou la restauration collective, comme ce fut le cas à Toulouse en 2023 (botulisme lié à des sardines en bocal de fabrication « maison », 12 hospitalisations, 1 mort) (Efsa, ECDPC, 2024).

Même si, en Europe, les problèmes de sécurité sanitaire engendrent un nombre très limité d'hospitalisations et de décès au regard de la quantité d'aliments issus des industries agro-alimentaires, la peur fait désormais partie de la culture du consommateur, qui a adopté un rapport de défiance quasi systématique. Cette suspicion vis-à-vis des produits dits « industriels » se traduit notamment par une opposition aux produits « ultratransformés ». Cependant, il n'existe pas de définition établie, objective et généralement acceptée de ce qu'est un aliment ultratransformé, mais au contraire une multiplication de classifications souvent floues et ambiguës (voir encadré *infra*).



LES NOTIONS D'« ULTRATRANSFORMATION » ET DE *MINIMAL PROCESSING*

Le terme « ultratransformation », inspiré par les écrits du journaliste Michael Pollan, a été repris par Carlos Monteiro, un épidémiologiste brésilien, qui a créé la classification Nova. Celle-ci reste la plus connue, même si elle s'inscrit dans une dynamique du début des années 2000 (tableau 2). Il a montré une corrélation entre la transition alimentaire, notamment la consommation de certains aliments industriels par des populations pauvres, et le développement de maladies chroniques. Or, les agences de santé publique, telles que le Comité consultatif scientifique sur la nutrition du Royaume-Uni, les Nordic Nutrition Guidelines, l'Agence pour la sécurité alimentaire et l'alimentation (Asean) en Espagne, ou l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) en France s'accordent toutes pour critiquer ces schémas de classification du fait de leur imprécision et de leur large portée, qui conduisent à des conclusions trop simplifiées. Plus spécifiquement, pour l'Anses, les limites de la classification Nova conduisent l'agence à considérer qu'elle ne peut servir directement de base pour la construction d'outils de prévention des maladies chroniques non transmissibles, tels que des recommandations ou l'inclusion dans un mécanisme de catégorisation (Anses, 2024).

Cependant, la classification Nova continue à être utilisée par des équipes d'épidémiologistes et de nutritionnistes, qui s'appuient sur des études observationnelles pour interpréter l'effet d'aliments ou de composés cibles sur la santé du consommateur. Elle est surtout relayée de façon alarmiste par certains médias vers un public suspicieux vis-à-vis des aliments transformés industriellement. Elle s'impose ainsi dans le débat actuel sur la manière dont il faut formuler et traiter les aliments pour en préserver la qualité, et donc les conserver. Or, il n'y a pas de définition établie, objective et généralement acceptée de ce qu'est un aliment ultratransformé, mais une multiplication de classifications plus ou moins arbitraires (tableau 2). Ces classifications, qui ne proposent pas d'arbre décisionnel clair, sont sujettes à des interprétations variées, et sont donc difficiles à mettre en œuvre. Le riz en est un exemple. Comme il était familier pour les auteurs de la classification, il apparaît comme non transformé sous toutes ses formes dans la classification Nova, tandis que le riz blanc apparaît comme « transformé » dans la classification de l'université de Caroline du Nord (UNC, tableau 2).

.../...

.../...

Le terme « ultratransformé », tel qu'il apparaît dans la presse, décrit une réalité plutôt en lien avec une formulation importante de l'aliment, de ses composants ou de ses ingrédients, et le fait de savoir qui l'a préparé. Le lien entre formulation et ultratransformation rejoint ainsi la problématique du *clean label* et du « cuisiner chez soi ». Un point commun aux classifications des aliments ultratransformés est de déprécier les aliments dits « industriels ». Elles ne tiennent ainsi pas compte du fait que la qualité nutritionnelle d'un aliment va être affectée par la recette et par les conditions d'application des procédés, que l'aliment soit fabriqué à la maison, dans un restaurant ou dans une industrie. Par exemple, le gâteau quatre-quarts, une recette classique de la cuisine familiale française, serait par définition ultratransformé : œuf, farine, sucre, beurre, sel, levure chimique (additif), souvent un arôme (additif) tel du sucre vanillé ou des écorces d'orange, ce qui ne correspond pas forcément à l'idée que s'en fait le consommateur.

La notion d'« ultratransformation » n'a de rapport, ni avec les définitions en science des aliments et en génie des procédés alimentaires, ni avec celles présentes dans les réglementations et les codes des usages industriels, ce qui est source d'incompréhensions majeures avec les professionnels, et de confusion pour le public. Ainsi, la farine est identifiée par la plupart des consommateurs comme un ingrédient simple, contrairement au pain, alors que la complexité du procédé se situe, pour l'homme de l'art, dans la mouture elle-même. Enfin, le terme *minimal processing*, utilisé dans les classifications liées à l'ultratransformation, correspond globalement aux technologies traditionnelles de conservation des aliments (séchage, fermentation, **appertisation**, pasteurisation, etc.), et cela même lorsqu'elles sont menées dans des conditions intenses qui changent profondément la composition, la texture et l'arôme. Ainsi, le café apparaît dans la classification Nova comme *minimally processed*, alors qu'il a été fermenté, torréfié, broyé et extrait, la torréfaction du café étant connue pour générer de nombreuses molécules potentiellement toxiques. La fabrication du café ne correspond pas au terme *minimally processed* utilisé en technologie des aliments, qui désigne des méthodes physiques innovantes et souvent athermiques de conservation (hautes pressions, **champs électriques pulsés**, etc.), choisies pour mieux préserver les caractéristiques initiales du produit agricole.

.../...

.../...

Tableau 2. Classification des aliments selon le degré de transformation et les critères pris en compte.

Nom	NIPH	IARC-EPIC	NOVA	IFPRI	IFIC	USP	UNC	SIGA
Date	2007	2009	2010, 2019	2011	2012	2015	2015	2018
Nombre de catégories	3	3	4	3	5	3	3	7
Critères retenus								
Lieu de la transformation (maison, restauration, industriel)	Oui	Oui*	Oui	Non	Oui	Oui	Oui*	Oui
Nature traditionnelle du produit	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui
Nature des opérations de transformation*	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Présence d'additifs	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Formulation	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Composition nutritionnelle	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui
Prêt à l'emploi ou non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non

*Ne s'appliquent qu'aux transformations industrielles.

NIPH : Institut national de santé publique du Mexique ; IARC-EPIC : Centre international de recherche sur le cancer (IAR-CIRC), à l'aide d'une méthodologie conçue pour l'étude EPIC (European prospective investigation into cancer and nutrition) ; Nova, proposée en 2010 et révisée en 2019 (Brésil) ; UNC : Université de Caroline du Nord (USA) ; SIGA (France) : système privé de l'entreprise SIGA, qui vend des conseils d'amélioration de la qualité des aliments aux professionnels de l'industrie agroalimentaire.

De nombreuses hypothèses ont été avancées pour expliquer les tendances observées dans des études épidémiologiques observationnelles. Pour pouvoir progresser scientifiquement et remédier aux effets potentiellement néfastes de l’ultra-transformation, il conviendrait de mettre en regard des niveaux de transformation réellement subis par le produit. En effet, des études récentes et plus précises montrent que ce sont seulement quelques catégories d’aliments ultratransformés qui sont concernées (Cordova *et al.*, 2023), d’autres, telles les formules infantiles, pouvant être associées à des effets bénéfiques. Mais les discussions autour des notions de « naturalité », de *clean label* et d’« ultratransformation » vont bien au-delà de l’analyse scientifique. Elles constituent un véritable phénomène de société qui a d’ores et déjà des implications sur les politiques publiques de santé et de durabilité, ainsi que sur les responsabilités respectives des différents acteurs de la chaîne alimentaire. Ces débats ont pour effet positif de montrer une volonté partagée d’améliorer la santé par l’alimentation. Néanmoins, ils peuvent aussi avoir des effets négatifs, en particulier sur la durabilité.

CONSÉQUENCES DE LA SUSPICION ENVERS LES ALIMENTS TRANSFORMÉS SUR LA DURABILITÉ DES FILIÈRES

Le rejet potentiel des aliments transformés par le consommateur pourrait lui faire oublier les raisons fondamentales pour lesquelles les procédés de transformation-conservation sont indispensables pour assurer la sécurité et la sûreté alimentaires. Une anxiété grandissante pourrait ainsi détourner son attention des régimes équilibrés et, en le culpabilisant autour du « fait maison », conforter les inégalités de genre, les courses et la cuisine reposant encore majoritairement sur les femmes.

Par ailleurs, ce rejet des aliments ultratransformés s’accompagne d’une contestation d’un fractionnement jugé excessif et délétère des matières premières agricoles. Néanmoins, cette approche permet de valoriser au mieux toutes les fractions des aliments, avec des valorisations croisées entre filières, ce qui est vertueux en matière de durabilité environnementale. Sortir de cette



logique de fractionnement risquerait de remettre en question cette durabilité et il serait intéressant d'en mesurer l'impact. Par exemple, le fractionnement du lait (ou formation du petit-lait) évite le gaspillage des précieuses protéines du sérum en offrant une alternative au rejet dans l'environnement ou à leur usage traditionnel comme aliment pour les porcs. Enfin, ces notions qui promeuvent l'utilisation systématique de produits frais toute l'année peuvent avoir des conséquences importantes sur l'autonomie alimentaire, par exemple pour les fruits et légumes, et sur les coûts de l'alimentation.

LES DÉFIS LIÉS À LA SAISONNALITÉ DES FRUITS ET LÉGUMES

Alors que les grains et les graines, naturellement desséchés au cours du processus de croissance et de maturation, se conservent relativement facilement dans des silos, ce n'est pas le cas des fruits et légumes. Ces derniers sont par nature des produits « de saison », avec des périodes de production définies, dont la durée de vie est limitée après récolte. La plupart du temps, une partie non négligeable de la récolte est transformée pour ne pas être perdue. On distingue la transformation primaire, qui consiste en l'application d'une étape de stabilisation dans les heures qui suivent la récolte, des transformations secondaires, qui vont amener le produit jusqu'à sa distribution au consommateur.

Assurer la présence de fruits et légumes frais tout au long de l'année sur les tables des consommateurs est un véritable défi. Même des fruits ou des légumes vendus « en saison » doivent être stockés dans des conditions bien définies pour arriver en bon état jusqu'au consommateur : en général, près de dix jours s'écoulent entre la récolte et la vente, et le stockage permet d'étendre la période de disponibilité. Stocker des fruits et légumes frais consiste à ralentir leur métabolisme par un refroidissement et une atmosphère appauvrie en O_2 (atmosphère contrôlée), tout en évitant les désordres physiologiques appelés « maladie du froid ». Il faut pour cela maintenir une certaine circulation de l'air pour éviter la condensation, avec un air suffisamment humide pour éviter le dessèchement du produit (en général des humidités relatives comprises entre 90 et 95 %). Cette circulation d'air prévient l'accumulation de l'hormone de maturation qu'est l'éthylène.

.../...

.../...

C'est pourquoi les stockages longue durée impliquent une récolte avant le déclenchement de la production d'éthylène et le pic de respiration pour les fruits climactériques, c'est-à-dire avant maturité complète. La maturation peut se poursuivre de façon très ralentie pendant le stockage (pomme) ou être déclenchée, soit par la sortie du froid (poire), soit par diffusion d'éthylène dans l'atmosphère entourant le produit (kiwi, banane). Avant leur mise en stockage, les fruits et légumes sont lavés et conditionnés. Déjà à cette étape, un contrôle de la température est nécessaire, qu'il s'agisse d'un prérefroidissement ou d'utiliser un lavage à l'eau chaude pour déclencher certains mécanismes de défense. Les chambres d'entreposage ou les conteneurs de transport sont donc des lieux refroidis, clos, mais ventilés, dans lesquels une atmosphère contrôlée est mise en place. Il y a un équilibre à trouver, qui est propre à chaque espèce et même à chaque variété. Les durées de stockage vont varier de quelques semaines (abricot, pêche) à plusieurs mois (pomme, poire, kiwi). Une température de consigne plus basse et une teneur en O_2 plus faible permettent une conservation plus longue. Ainsi, une pomme « fraîche » d'origine française au mois d'avril aura passé plus de six mois en atmosphère contrôlée depuis sa récolte, et aura un impact environnemental supérieur à celui de son homologue importée de Nouvelle-Zélande par bateau. Les pommes de terre (sauf primeurs) sont conservées selon les mêmes principes. Augmenter la consommation des produits frais toute l'année entraîne donc la mise en œuvre de procédés de conservation complexes, dont les conséquences sur la durabilité ne sont pas négligeables, que ce soit en termes de stockage, de logistique ou de pertes et gaspillages.



REFORMULER POUR PLUS DE « NATURALITÉ » ?

De nombreux aliments sont préparés pour être conservés puis consommés. Le sel, le sucre et certaines épices sont utilisés pour allonger la durée de vie du produit et pour stimuler la perception sensorielle du consommateur. Dans les pays occidentaux, le sel et le sucre sont les ingrédients les plus fréquemment utilisés. Leur consommation en excès conduit, avec celle des graisses saturées, à augmenter le risque de maladies cardiovasculaires. Des programmes nationaux de prévention (Programme national nutrition santé, PNNS, lancé en 2001) ont été menés en collaboration avec les acteurs de la filière agroalimentaire pour diminuer leur présence dans les aliments. De nombreux autres ingrédients, additifs ou auxiliaires de fabrication peuvent être ajoutés pour préparer les aliments. L'obligation légale de mentionner sur l'étiquette tous les additifs présents répond à un souci de transparence et permet d'éviter les fraudes. Additifs et auxiliaires de fabrication font d'ailleurs l'objet, en Europe, de listes dites « positives » (tout ce qui n'est pas autorisé est interdit) et d'une autorisation dans des conditions précises (type d'aliment, teneurs maximales), accordée par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) après étude de dossiers toxicologiques. Néanmoins, cela ne suffit pas à rassurer le consommateur, bien au contraire, les opérations de formulation de l'aliment lui apparaissant de plus en plus complexes et suspectes. Cette suspicion conduit de nombreux consommateurs à militer pour le développement de produits *clean label*. La tendance dite *clean label* s'est développée depuis les années 2010 et pourrait être résumée comme le choix d'un aliment formulé avec peu d'ingrédients, aux noms familiers. Elle est basée sur l'association perçue par les consommateurs entre l'utilisation d'additifs, d'ingrédients ou d'auxiliaires de fabrication, et leurs effets possibles sur le métabolisme humain et sur le cancer, ou sur des maladies chroniques (voir encadré *infra*).

LES REVENDEICATIONS *CLEAN LABEL*

Le concept de *clean label* n'a pas de définition scientifique ou légale. Il peut être très englobant et signifier, pour certains, un produit sans OGM ou sans composés susceptibles d'apporter des inconforts digestifs, des intolérances ou des réactions allergiques (sucres fermentescibles comme l'inuline ou le sorbitol, lactose, gluten, protéines d'œufs, de crustacés, d'arachide, etc.). Il existe aussi une tendance à englober dans le *clean label* des notions liées à la durabilité (remplacement des protéines animales par des protéines végétales), à l'éthique ou à la traçabilité des ingrédients utilisés dans les recettes. Le *clean label* est également parfois associé au *minimal processing*. Nous nous attacherons ici à une définition plus stricte du concept, qui consiste à vouloir diminuer le nombre d'additifs qui apparaissent dans la liste des ingrédients des plats préparés. La réglementation européenne en détaille les catégories selon leur fonction (identifiées dans le « numéro E »), dont les principales sont listées ci-dessous, et impose que tout additif présent apparaisse sur l'étiquette :

- E1XX, colorants ;
- E2XX, conservateurs ;
- E3XX, antioxydants ;
- E4XX, agents de texture ;
- E5XX, antiagglomérants ;
- E6XX, exhausteurs de goût ;
- E7XX, agents de sapidité ;
- E9XX, édulcorants ;
- E14XX, amidons modifiés.

Les auxiliaires de fabrication, présents à l'état de traces dans le produit fini, n'apparaissent pas dans cette liste et sont moins connus du consommateur. Ils sont donc moins pointés du doigt, même s'ils font partie du débat sur le *clean label*. Certains ingrédients leur étant peu familiers sous la revendication *clean label*, certains consommateurs militent également pour le *clear label*, c'est-à-dire pour un étiquetage plus compréhensible et comportant des noms d'ingrédients rassurants. Certains industriels, qui ont bien compris cet enjeu, insistent sur le nom de l'additif, en plaçant sa nomenclature entre parenthèses. La démarche la plus fréquente consiste à montrer que les additifs ont été extraits de plantes connues ou à vanter leur caractère « naturel ».

Il ne s'agira ici ni de discuter des perceptions du consommateur, ni des stratégies de marketing autour du *clean label*, ni de détailler l'ensemble des problèmes technologiques liés à la réduction ou au remplacement des additifs en général, mais de cibler ceux dont la réduction ou l'élimination posent problème en termes de conservation des aliments, c'est-à-dire de sécurité sanitaire ou de stabilité biochimique ou texturale du produit. Les problèmes d'aromatisation, de couleur ou de recherche d'édulcorants ne seront pas traités, sauf quand ils sont le fait d'ingrédients ou d'additifs qui ont un rôle à la fois sur la conservation et sur le goût du produit.

STABILITÉ MICROBIOLOGIQUE DU PRODUIT

Les principaux conservateurs utilisés traditionnellement pour stabiliser microbiologiquement les produits animaux sont le sel (chlorure de sodium), les nitrites et les composés liés aux fumées.

Dans la réduction de la quantité de sel, c'est le sodium qui est visé. Ce dernier a des effets physiologiques bénéfiques sur la santé humaine. Il maintient l'équilibre des fluides dans l'organisme, améliore la capacité du sang à transporter le CO_2 , participe à la transmission de l'influx nerveux et facilite l'absorption du potassium. Le chlorure est en outre un composant des sucs digestifs de l'estomac. Mais la consommation excessive de sodium conduit à de l'hypertension, augmente le risque de maladies cardiovasculaires et favorise l'ostéoporose. La consommation en sel des Français est actuellement comprise entre 8 et 9 g par jour, ce qui est bien supérieur aux 5 g (soit 2 g de sodium) recommandés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). La principale source de sodium dans l'alimentation est le chlorure de sodium, ajouté lors de la fabrication des aliments. Il est essentiel pour les qualités technologiques et gustatives de l'aliment et participe à sa conservation, puisqu'en réduisant l'activité de l'eau, il inhibe ou diminue la croissance des micro-organismes, dont celle des bactéries pathogènes. L'augmentation de la teneur en sel accroît à la fois la saveur salée et la perception des autres saveurs (rôle d'exhausteur de goût). Les rôles de conservateur et gustatif

du sel tendent à se renforcer l'un l'autre. En effet, même si la préférence pour le goût salé est connue pour être « innée », le niveau de préférence pour le chlorure de sodium est appris. Cinq types d'aliments représentent plus de 85 % de l'apport de sodium par les produits transformés. Ce sont, dans un ordre d'apport décroissant, le pain et les produits de boulangerie, les produits charcutiers, les soupes, les plats composés et les fromages. Sous l'influence du Programme national nutrition santé, les professionnels ont fait des efforts pour réduire la teneur en chlorure de sodium dans leurs produits, tout en essayant de maintenir à la fois leurs propriétés technologiques et sensorielles, leur sécurité sanitaire et leur durée de conservation. Cela constitue néanmoins un véritable défi, et les réductions de sodium sont encore trop limitées.

Pour aller plus loin, il faut améliorer nos connaissances sur les mécanismes d'action du sel et les limites théoriques minimales nécessaires pour obtenir la même sécurité sanitaire et les mêmes qualités de produit qu'avec les taux actuels. Les stratégies de réduction diffèrent en fonction du type de produit. Les plus fréquentes consistent à ajouter d'autres ingrédients qui compensent la réduction du taux de sel ou à le remplacer partiellement par des sels de substitution qui ne contiennent pas de sodium. Puisque c'est l'excès de sodium qui pose problème, il est théoriquement possible de remplacer une partie du chlorure de sodium (NaCl) par des sels de substitution tels que le chlorure de potassium (KCl) ou le chlorure de calcium (CaCl₂). Leur excès peut néanmoins entraîner une **hyperkaliémie** ou une **hypercalcémie**, des défauts d'amertume, de flaveur, voire de texture, comme dans le cas du saucisson sec. Les principaux défauts sensoriels dus aux sels de substitution peuvent être corrigés par l'ajout d'exhausteurs de goût ou d'agents masquant, mais cela ne va pas dans le sens des attentes de certains consommateurs sur les produits *clean label*.

Dans la mesure où le niveau de préférence pour le chlorure de sodium est appris, il est aussi possible d'en réduire progressivement l'apport pour que le consommateur l'accepte plus facilement. Cette stratégie a été mise en œuvre pour le pain, avec une réduction par paliers, concertée entre tous les professionnels,



afin d'éviter un report des consommateurs vers des pains plus «goûteux», car plus salés, et sans affecter la levée de la pâte. La perception salée peut être renforcée en ajoutant dans l'aliment des arômes de produits (très) salés, par exemple l'arôme d'anchois. Néanmoins, les habitudes sensorielles des consommateurs et les modes d'apport de sel diffèrent d'une culture culinaire à l'autre. Il convient donc d'en tenir compte dans les stratégies de réduction de la teneur en sel. Enfin, dans les produits riches en matière grasse, la réduction du chlorure de sodium peut augmenter l'oxydation des lipides et l'apparition de goût de rance. L'encadré ci-dessous illustre quelques recherches menées pour réduire la teneur en sel dans des produits carnés cuits ou secs.

LA RÉDUCTION DU SEL DANS LES PRODUITS CHARCUTIERS

En France, la teneur en sel ne dépasse pas 2 % dans le jambon cuit supérieur. Le sel assure l'extraction des protéines qui permettent la cohésion entre les différents muscles constituant la tranche de jambon cuit. En laboratoire, il est possible de diviser de moitié la teneur en sel du jambon cuit supérieur sans affecter la cohésion des tranches de jambon. Mais ce résultat reste difficile à appliquer dans l'industrie où les conditions de fabrication sont plus variables. La teneur en sel des produits carnés secs est bien plus élevée, en général comprise entre 6 % et 8 %. Sa diminution accélère la dégradation des protéines et des lipides, et conduit à des produits qui ont tendance à être mous et rances. Pour réduire la teneur en sel dans un jambon sec, il faut être capable d'assurer sa répartition homogène dans le produit. Comme le jambon est épais, il faut à la fois raccourcir l'étape de salage et rallonger l'étape de repos, pendant laquelle la teneur en sel s'uniformise dans le produit. Des recherches récentes ont conduit au développement d'un outil numérique permettant d'optimiser la conduite de ces deux étapes afin de maîtriser la texture des jambons secs à teneur en sel réduite. Des modèles mathématiques sont également en cours de développement pour optimiser la fabrication de saucissons secs réduits en sel et en matière grasse.

En Europe, depuis l'Antiquité, les nitrates sont ajoutés aux salaisons sous forme de **salpêtre**, ensuite converti en nitrite. L'ajout de nitrite de sodium est devenu systématique lors de la production industrielle du jambon cuit, et souvent du jambon sec. Dans les charcuteries cuites telles que le jambon « de Paris », les barèmes de **pasteurisation** appliqués par les professionnels (code des usages de la charcuterie cuite) sont suffisants pour éliminer tous les micro-organismes présents sous **forme végétative** dans les produits cuits. Les risques sanitaires viennent donc soit des spores initialement présentes sur le produit, et qui germent au cours du refroidissement ou du stockage de la charcuterie, soit d'une recontamination post-cuisson par des micro-organismes présents dans l'environnement. Ce sont les nitrites qui assurent la sécurité microbiologique vis-à-vis des spores des micro-organismes pathogènes. En effet, les nitrites ont d'abord un rôle sanitaire, en limitant la germination et la croissance des bactéries pathogènes sporulées comme *Clostridium botulinum*. Ils stabilisent la couleur des charcuteries (rouge foncé pour les salaisons et rose pour le jambon cuit), mais aussi leur flaveur, en leur donnant un goût caractéristique, tout en évitant que le produit ne devienne rance au cours de sa conservation (oxydation des lipides). Avant 2015, l'ajout de nitrites dans les charcuteries était déjà très faible et strictement réglementé par des directives européennes, qui en fixaient la dose maximale pour les aliments conventionnels et pour les produits bios. À la suite du rapport du Centre international de recherche sur le cancer (CICR) de 2015, qui pointait les charcuteries comme un facteur important de risque de développement des cancers colorectaux, les nitrates, les nitrites et la formation de nitrosamines ont été fortement mis en cause. Les professionnels français ont donc décidé de baisser la quantité de nitrites dans les charcuteries. Certains industriels ont remplacé cet ajout par des bouillons ou des extraits de légumes, riches en nitrates/nitrites, et ont vanté ces produits comme plus naturels, car « sans nitrites ajoutés ». Les résultats de la recherche montrent que l'action de ces bouillons, ou extraits, n'est efficace que si les nitrates contenus dans le produit végétal sont transformés en des doses de nitrites équivalentes à celles ajoutées directement dans les viandes. Cela



n'améliore donc en rien la situation, puisque les nitrites sont toujours présents dans les charcuteries et qu'il est encore plus difficile d'en contrôler la quantité. Cet ajout d'extraits, plus risqué pour la santé, a pourtant séduit certains consommateurs, du fait du caractère « naturel » de l'ingrédient végétal d'origine. Le législateur a donc exigé que ces extraits soient considérés comme des additifs et qu'ils soient déclarés comme tels sur l'emballage. Le plan d'action « Réduction de l'utilisation des additifs nitrites/nitrates dans les aliments », lancé en 2023 par le gouvernement français, exige l'élimination totale et immédiate des nitrites pour certaines saucisses à griller. Pour le jambon cuit, la quantité de nitrites ajoutée doit être ramenée à zéro par paliers successifs d'ici mars 2029. Pour les charcuteries sèches et/ou fermentées, les réductions demandées sont moins fortes, mais elles posent de véritables défis et présentent des enjeux importants de sécurité sanitaire. Il serait regrettable, par exemple, qu'une diminution du risque de cancer colorectal conduise à des intoxications par *Clostridium botulinum*, qui sont souvent mortelles. Par ailleurs, des résultats récents concernant les mécanismes de l'association entre la consommation de viande et le risque de cancer du côlon identifient d'autres agents susceptibles de favoriser les cancers colorectaux, comme le fer héminique (Pierre, 2019). L'effet pro-oxydant du fer héminique augmente la formation des composés issus de l'oxydation des lipides, qui seraient toxiques pour les cellules du côlon. Cet effet pourrait être pallié par l'ajout d'antioxydants dans le régime des consommateurs, lors de la formulation de l'aliment, et même dans l'alimentation des animaux de boucherie.

Le fumage est traditionnellement associé au séchage pour conserver les viandes et les poissons. Ce sont à la fois la diminution de l'activité de l'eau et les composés bactéricides (qui tuent les bactéries) déposés sur le produit par la fumée qui permettent de stabiliser microbiologiquement le produit. Le fumage apporte une saveur caractéristique qui dépend des essences de bois ayant servi à la combustion. Malheureusement, certains composés de la combustion sont cancérigènes. Des dispositifs de fumage à froid ou l'utilisation d'arômes de fumée ont donc été conçus pour ne déposer en surface du produit que les composés qui sont

bactéricides et sapides, les composés cancérigènes n'étant plus présents dans les extraits de fumée déposés. D'autres dispositifs ont été développés pour combiner récupération de chaleur, condensation des fumées et extraction des composés cancérigènes. Cependant, l'évolution de la réglementation liée aux tendances *clean label* s'oriente plutôt vers une élimination des arômes de fumée dans les produits industriels, même si, de manière contradictoire, les pratiques de fumage sont souvent promues par des chefs médiatiques et la cuisine au barbecue reste populaire.

Le sucre est un ingrédient à double fin, utilisé à la fois pour son effet gustatif et pour son effet conservateur, de par la diminution de l'activité de l'eau qu'il entraîne. Remplacer le sucre implique donc de maîtriser ces deux effets. Le goût sucré peut être fourni par des édulcorants intenses, ou sa perception renforcée par certains arômes (arôme de vanille). Comme pour le sel et l'arôme d'anchois (voir « Stabilité microbiologique du produit »), cette approche utilise les interactions sensorielles et les habitudes culturelles impliquées dans la formation de l'image mentale des aliments. Cependant, ces composés de remplacement n'ont pas d'effet sur l'activité de l'eau. Cela conduit à une augmentation des risques microbiologiques associés ou à une compensation par un ajout de matière grasse, qui permet de faire barrière à l'eau. Les édulcorants sont donc souvent utilisés en combinaison avec des ingrédients ou des additifs qui vont capter l'eau tout en fournissant de la matière et de la texture. Ce sont en général d'autres glucides, soit des **édulcorants massiques** comme le sorbitol, faiblement sucrés mais avides d'eau, ou des **perméats** de lactosérum (ou « petit-lait ») riches en lactose, soit des fibres alimentaires (marc de pomme désucré, inuline, fructo-oligosaccharides, etc.). Tous auront le même inconvénient de potentiellement causer des inconforts digestifs, car ils sont fermentés par les micro-organismes du côlon.

Stabilité oxydative des produits alimentaires

De très nombreux antioxydants existent dans les tissus des animaux et des plantes pour protéger les organismes vivants, et persistent après la mort de l'animal ou la récolte du végétal. Le

rôle de l'emballage est crucial pour prévenir l'oxydation. Ce rôle peut être différent pour les produits végétaux, où la réaction de respiration se poursuit après la récolte des produits, et pour les viandes, où elle s'arrête après l'abattage. Pour stopper la pénétration de l'O₂ de l'atmosphère vers le produit, l'aliment peut être conditionné sous vide, ou sous gaz inertes, en associant ce conditionnement à un emballage imperméable à l'O₂ et opaque à la lumière. Il est également possible de laisser diffuser l'O₂ de l'air de manière contrôlée au travers de l'emballage ou d'en piéger une partie. Dans d'autres cas, de l'O₂ est au contraire introduit à dessein dans l'emballage pour maintenir la couleur du produit (emballage sous atmosphère modifiée riche en O₂ pour maintenir la couleur rouge vif de la viande de bœuf). Les réactions d'oxydation peuvent alors être ralenties par la présence d'antioxydants, qu'ils soient naturellement présents dans le produits ou ajoutés à dessein pour le stabiliser. La suite de cette sous-partie se focalise sur les produits qui sont ajoutés aux produits alimentaires pour pouvoir prolonger leur conservation.

Les antioxydants utilisés en industrie agroalimentaire peuvent être classés en quatre catégories : les composés qui piègent les espèces réactives de l'O₂ (comme la vitamine E), les composés réducteurs (comme la vitamine C ou l'ascorbate), les agents qui **chélatent** des ions métalliques catalyseurs de l'oxydation (comme l'acide citrique ou les phosphates) et les sulfites. Tout comme les nitrates/nitrites, les sulfites sont des additifs utilisés de longue date, mais controversés, car environ 1 % de la population y est allergique. Les sulfites sont essentiellement utilisés pour prévenir le brunissement de certains aliments, comme les fruits secs (abricots, raisins « blonds », etc.) ou les flocons de pomme de terre, et pour stabiliser les vins. Malgré de nombreux efforts de la communauté scientifique, y compris au travers de projets européens, il n'existe pas de solution simple et satisfaisante pour les remplacer.

LES SULFITES

Les sulfites ont un double rôle d'inhibiteur du brunissement **enzymatique** et d'antimicrobien.

Deux stratégies sont possibles pour éviter le brunissement enzymatique : inhiber les enzymes qui en sont responsables ou empêcher les composés formés à partir de l'oxydation des **polyphénols** d'évoluer en pigments bruns. Les sulfites sont particulièrement performants, car ils inhibent de façon irréversible les enzymes responsables de l'oxydation des polyphénols. Certains agents (l'acide citrique, l'acide éthylènediaminetétraacétique) peuvent agir directement sur le site actif des **oxydases** ou sur les radicaux responsables du déclenchement des réactions d'auto-oxydation. Ils se démarquent des antioxydants au sens strict, qui captent les radicaux libres, comme le butylhydroxyanisole (BHA) ou les extraits végétaux riches en composés phénoliques (romarin, thé vert, tocophérols). Ces derniers retardent mais ne suppriment pas l'oxydation, en étant consommés en priorité, à la suite de quoi l'oxydation reprend.

L'importance des sulfites dans les vins est liée au risque de développement de levures du genre *Brettanomyces* (notamment *B. bruxellensis*), qui sont responsables de défauts de flaveur : odeur d'écurie, de vernis, etc. (les professionnels parlent de « goût de Brett »). Les *Brettanomyces* sont des contaminants persistants dans les chais, capables de s'implanter dans le bois des tonneaux. Des solutions chimiques comme le chitosane (d'efficacité limitée dans le temps), le dicarbonate de diméthyl (peu efficace pour de gros volumes), le lysozyme (allergène), des tanins œnologiques (qui ont un effet sur la perception du vin) ou l'acide sorbique (qui nécessite une complémentation par des sulfites) ; ou des solutions physiques, comme la pasteurisation (60 °C), éventuellement combinée à une filtration **stérilisante** (à l'embouteillage) ou l'application de méthodes de décontamination non thermiques, mais qui tendent à altérer les qualités sensorielles des vins, ont été tentées, avec peu de succès. L'utilisation d'agents de biocontrôle avec des **bactériocines** ou peptides antimicrobiens est désormais proposée, mais certains inhibent aussi la levure *Saccharomyces cerevisiae* ou ont des effets variables selon les souches de *Brettanomyces*. Par ailleurs, l'absence de sulfites ajoutés ne veut pas dire « sans sulfites », car certaines levures présentes dans le vin en produisent.



Dans une démarche de *clean label*, les consommateurs souhaitent l'abandon ou la réduction de la quantité des antioxydants chimiques, en particulier des nitrites ou des sulfites. Ils sont également favorables au renforcement de la concentration des aliments en «antioxydants naturels», pas nécessairement dans l'objectif premier d'augmenter leur durée de conservation ou d'améliorer leur couleur ou leur saveur, mais plutôt parce que les antioxydants sont considérés comme bénéfiques pour la santé. Les antioxydants végétaux les plus connus, perçus par les consommateurs comme naturels et bénéfiques pour la santé, sont les tocophérols (vitamine E) et les polyphénols. Pour les consommateurs, le caractère naturel est lié au fait que l'antioxydant est déjà présent dans le produit ou qu'il provient d'extraits de produits végétaux perçus comme naturels.

Au-delà du ressenti des consommateurs, la recherche doit analyser le bénéfice-risque des différents antioxydants, indépendamment de leur perception comme «chimiques» ou «naturels». Elle doit aussi, dans un souci de durabilité, suivre le règlement européen «Registration Evaluation Authorization of Chemicals» (REACH), adopté en 2006, qui encadre la fabrication et l'utilisation des composés chimiques en Europe, et, par principe de précaution, remplacer au maximum les solvants chimiques utilisés pour l'extraction des antioxydants par des solvants «verts» ou par des méthodes physiques (ultrasons, micro-ondes, etc.). Des travaux sont également en cours pour renforcer la concentration en antioxydants dans les produits animaux ou les plantes, au travers de la nutrition animale ou des pratiques agricoles. La supplémentation des rations animales en vitamines E et C a ainsi été testée. Le transfert des antioxydants vers les tissus des animaux vivants dépend de leur solubilité (liposolubilité pour la vitamine E et hydrosolubilité pour la vitamine C). Il est en général plus efficace chez les animaux monogastriques que chez les ruminants.

L'apport d'antioxydants «naturels» par mélange avec les produits alimentaires a également été beaucoup étudié. La majeure partie des antioxydants utilisés sont des extraits de plantes et de graines (thé vert, café, algues, extraits de fruits, pistaches) ou d'épices (romarin, origan, ail, paprika ou clou de girofle). Certains extraits ralentissent l'oxydation des viandes et des poissons sans

en modifier la couleur ou la flaveur avec une efficacité comparable à celle de la vitamine E de synthèse ou des nitrites. Les solutions utilisées pour limiter l'oxydation des fruits frais dans les produits prédécoupés combinent souvent les acides citrique et ascorbique, qu'ils soient ajoutés en tant que tels ou présents dans des jus de citron ou d'acérولا. En effet, il y a alors un triple effet anti-brunissement : la diminution du pH limite l'activité des oxydases, la chélation du cuivre et du fer par l'acide citrique prévient l'auto-oxydation et, enfin, l'acide ascorbique réduit les composés oxydés. De nombreux composés phénoliques ont été testés pour leur capacité à limiter le brunissement enzymatique, en agissant comme des substrats alternatifs ou inhibiteurs de l'enzyme. C'est le cas des flavanols, présents dans le thé vert, ou de certains acides phénoliques, comme l'acide *p*-coumarique ou l'acide carnosique et le carnosol (commercialisés comme extrait de romarin E392). Ces effets dépendent de la concentration de l'antioxydant ajouté, mais également de la manière dont il est mis en contact avec le produit, qu'il soit ajouté sous forme liquide plus ou moins soluble, sous forme de poudre, ou disposé dans un gel qui enrobe la surface du produit. Les types d'extraits et de mises en contact étant très variés, les possibilités sont très nombreuses. Un des défis auxquels doit faire face le chercheur est donc de trouver rapidement, et à moindre coût, les solutions les plus efficaces en fonction du type d'aliment, sans en changer la couleur et la flaveur.

L'ajout direct de broyats végétaux et d'épices pour rehausser la saveur des produits et accroître leurs propriétés antioxydantes peut poser des problèmes de contamination microbiologique (Salmonelles pour le poivre noir, *Bacillus cereus* pour des herbes aromatiques séchées). Les broyats végétaux et les épices pourraient être décontaminés par des procédés physiques acceptables par le consommateur, comme les micro-ondes pour le poivre, et l'**ozonation** pour les herbes aromatiques. Le développement d'approches systématiques basées sur les connaissances pluridisciplinaires en chimie, physico-chimie, analyse sensorielle et microbiologie devrait permettre d'aller dans cette direction avec l'aide du développement des techniques de modélisation, de traitement de données et d'intelligence artificielle.

STABILITÉ DE LA TEXTURE DU PRODUIT

Stabiliser la texture est un véritable défi pour les produits qui se présentent sous forme d'émulsions, de mousses ou de poudres. En effet, les liquides constituant l'émulsion peuvent se séparer, les mousses perdre leur structure et les poudres s'agglomérer. Ces problèmes retrouvent une actualité du fait de l'apparition de nouveaux produits émulsionnés, foisonnés ou **pulvérulents** orientés à la fois vers la diététique et le plaisir, dont la conservation fait appel à des ingrédients ou additifs ayant des propriétés émulsifiantes, moussantes ou anti-agglomérantes.

Stabiliser émulsions et suspensions implique de limiter les possibilités de migration des phases dispersées (crémage ou sédimentation). Il s'agit de faire en sorte que la résistance opposée à leur mouvement par la phase dispersante devienne supérieure à l'effet de la poussée d'Archimède, due aux différences de densité entre les deux phases. Cela peut être obtenu en augmentant la viscosité de la phase dispersante, par l'ajout d'**hydrocolloïdes** tels que des polysaccharides à haut pouvoir viscosifiant, comme la gomme guar, ou, mieux encore, avec un seuil d'écoulement, comme la gomme xanthane. Cela peut être conjugué à une diminution de la taille des particules de la phase dispersée, qui diminue aussi la force motrice, par exemple par **ultrasonication** (voir « Présentation des technologies athermiques »).

Pour limiter la **coalescence**, il est nécessaire de stabiliser les interfaces. C'est ici qu'interviennent les émulsifiants, qu'ils soient naturels ou synthétiques. Ces molécules sont dites « amphiphiles », car elles possèdent une partie hydrophile, ayant une affinité pour l'eau (la phase aqueuse), et une partie lipophile, ayant une affinité pour les matières grasses (les lipides). Elles vont venir s'adsorber aux interfaces et les rendre plus solides et « élastiques ». Cet effet est plus marqué pour les émulsifiants **macromoléculaires**, en particulier les protéines, souvent également utilisées pour la stabilisation des mousses. La stabilisation est d'autant plus efficace que le **film protéique** à l'interface gaz/liquide est plus épais. De nombreux composés protéiques ou lipidiques présents dans les produits animaux possèdent ces propriétés. Parmi les plus employés, on peut citer des composés de l'œuf, qu'il s'agisse du

jaune (lécithine) ou du blanc (ovalbumine), du lait (protéines de lactosérum) ou de la viande (gélamines, myosines). L'œuf est un ingrédient particulièrement intéressant pour ses propriétés stabilisantes : le jaune est riche en lécithine, un phospholipide très utile pour la réalisation d'émulsions (mayonnaise), tandis que les protéines du blanc sont l'exemple type d'agent moussant (œufs en neige, mousse au chocolat...).

Du fait de la transition alimentaire, la tendance actuelle est de remplacer ces composés animaux par des composés extraits de végétaux. Ces composés peuvent être émulsifiants, comme c'est le cas de certaines protéines de céréales (gluten de blé, zéine de maïs, protéines de riz), de légumineuses (soja, pois chiches). Ils peuvent aussi être épaississants, comme c'est le cas des polysaccharides extraits de graines (galactomannanes de graines de légumineuses), d'algues (alginates), de tiges (carbométhylcellulose), d'exsudats d'arbres (gomme arabique issue de l'acacia). Certaines saponines, qui sont des molécules détergentes et émulsifiantes naturellement produites par des plantes, ont aussi pu être proposées. D'autres bioémulsifiants, comme les mannoprotéines, les rhamnolipides ou les sophorolipides peuvent être formés par des micro-organismes. Parmi ces composés, nombreux sont ceux qui doivent être extraits ou produits en fermenteurs par des procédés biotechnologiques. Ils ne sont pas interchangeables, car les propriétés émulsifiantes dépendent de la composition de l'aliment en protéines, lipides, ions et minéraux, de son acidité, ainsi que de la température de stockage. Certains composés, comme la carbométhylcellulose, nécessitent des transformations chimiques pour acquérir un pouvoir émulsifiant. Ce dernier peut être perdu lorsque l'on chauffe le produit, du fait de la dénaturation de la protéine émulsifiante par exemple. Un autre objectif est d'optimiser le potentiel émulsifiant sans purification, par exemple pour des mélanges de composés. Une possibilité particulièrement étudiée récemment, appelée « émulsion de Pickering », consiste en l'utilisation de particules insolubles dans chacune des phases en présence. Ces particules s'adsorbent en surface des gouttelettes, où elles forment une couche solide. Ces émulsions « de Pickering » sont particulièrement stables contre la coalescence, moins contre le crémage, mais elles sont facilement remises en suspension. Des coproduits



végétaux peuvent être utilisés pour les former, ce qui a également l'avantage d'augmenter la durabilité des filières.

Stabiliser les poudres est plus complexe, mais essentiel pour en assurer la fluidité. Un facteur crucial est la stabilité des conditions ambiantes (humidité, température). Des agents anti-agglomérants peuvent être utilisés pour prévenir l'agrégation des particules, comme l'amidon dans le sucre glace. De nombreux anti-agglomérants sont des produits minéraux (talc, E533), plus stables dans le temps, mais dont les effets sur la santé sont remis en question, ou des sels d'acides gras (E572) pour stabiliser des produits gras.

Le rassissement des produits de boulangerie, dont les viennoiseries, peut être ralenti par la présence de lipides, via la formation de complexes entre des acides gras et les chaînes glucidiques de l'amidon, limitant sa recristallisation. C'est un des effets des matières grasses et l'un des rôles de la lécithine présente dans le jaune d'œuf dans les pâtisseries traditionnelles. Certains émulsifiants comportant des chaînes d'acides gras sont utilisés dans ce but, comme la lécithine ou des mono- et diglycérides. La présence de glucides, dont les fibres alimentaires, les produits de dégradation de l'amidon que sont le maltose et les maltodextrines ou les polyols (sorbitol), peut aussi ralentir la **rétrogradation**. Des enzymes, voire certains ferments, peuvent être utilisés pour libérer *in situ* du maltose et d'autres maltodextrines à partir de l'amidon, ou des acides gras à partir des lipides de la recette, limitant ainsi sa recristallisation. Les émulsifiants peuvent aussi être utilisés pour limiter la dégradation de la texture du chocolat due à la croissance des cristaux de beurre de cacao.

L'amidon est aussi un ingrédient épaississant majeur des industries agroalimentaires, qu'il s'agisse de farines ou de formes purifiées telle la fécule de pomme de terre. Certains amidons peuvent être spécifiquement modifiés (additifs de la classe E14XX) pour permettre d'avoir une texture plus stable dans le temps.

Outre ces solutions reposant sur l'emploi d'ingrédients ou additifs « naturels », une option qui séduit actuellement consommateurs et industriels est de les faire produire *in situ* par fermentation, par exemple par la production d'exopolysaccharides donnant leur texture aux produits laitiers frais.



FERMENTATION ET BIOPRÉSERVATION : COMMENT ASSOCIER DURABILITÉ ET NATURALITÉ ?

Ce chapitre aborde un aspect particulier de la conservation des aliments. Particulier, voire contre-intuitif, puisqu'il s'agit de lutter contre les contaminations microbiennes en favorisant la croissance microbienne.

Nous nous attacherons ici à décrire les fermentations et la biopréservation destinées à conserver des aliments (choucroute, fromage, saucisson, etc.) et à garantir leur sécurité sanitaire, dans le cadre d'une approche dite « technologies barrières » ou *hurdle technology*. Cette approche consiste à mettre en œuvre plusieurs facteurs, dont chacun ne fait que limiter la croissance des micro-organismes pathogènes (voir figure 6 et « Le concept de technologies barrières »), mais dont le cumul permet d'assurer la sécurité du produit. La production de boissons, alcoolisées ou non (vins, cidres, bières, kombucha, kéfir, etc.), et la panification ne seront pas abordées. La fermentation acétique de l'alcool en vinaigre ne sera pas non plus traitée, bien que l'acide acétique soit un conservateur. Ainsi, les fermentations sont, dans les cas qui vont suivre, soit combinées à des séchages permettant de limiter l'activité de l'eau (fromage, saucisson), soit associées à une conservation au froid (produits laitiers frais).

La fermentation utilise les activités métaboliques des micro-organismes convertissant des glucides en acides, en gaz ou en alcool pour générer de l'énergie. Ce processus se produit généralement en condition anaérobie (absence d'O₂) et permet de soutenir la croissance des micro-organismes fermentaires dans ces conditions défavorables à la croissance d'organismes aérobies (c'est-à-dire devant respirer pour vivre et croître). En fonction du composé majoritaire en fin de fermentation, on distingue les fermentations alcoolique, lactique, acétique et **propionique**,

menées respectivement par des levures, des bactéries lactiques, acétiques et propioniques. La fermentation dite « alcaline » est utilisée pour certaines transformations de végétaux. Elle permet la transformation de la matière première principalement par des enzymes **protéolytiques**, produites par des bactéries ou moisissures, qui décomposent les protéines, libérant ainsi des **acides aminés** et de l'ammoniac. Cela induit une augmentation du pH jusqu'à des valeurs pouvant atteindre pH 9.

La biopréservation vise quant à elle à allonger la durée de vie des aliments et à garantir leur salubrité, sans affecter les qualités **organoleptiques** des produits. Elle met en œuvre des bactéries lactiques, en recherchant seulement l'effet assainissant, par la production de molécules antagonistes ralentissant ou inhibant la croissance de micro-organismes indésirables. La biopréservation constitue une alternative intéressante pour garantir la sécurité sanitaire des aliments, en complément de la fermentation des produits laitiers ou carnés, afin de lutter contre certains pathogènes ou certaines moisissures.

HISTORIQUE DES RECHERCHES ET ÉVOLUTION DES MÉTHODES

Depuis les années 1950, une grande partie des travaux de recherche consacrés à la fermentation ont consisté à isoler et caractériser des souches de ferments, conservées par la suite dans des centres de ressources biologiques. Depuis les années 1990, les apports de la biologie moléculaire ont permis de comprendre les mécanismes impliqués dans l'adaptation de ces micro-organismes à la structure et à la composition des aliments, les voies métaboliques mises en jeu lors de la fermentation et celles impliquées dans les effets antagonistes de la croissance de micro-organismes indésirables. À partir des années 2000, la génomique (voir encadré *infra*) a mis en lumière la diversité des souches et de leurs potentiels. La classification des nombreuses espèces composant le genre *Lactobacillus*, très impliqué dans les fermentations, a été revue grâce à la comparaison des nombreux génomes de lactobacilles disponibles. Plus récemment, l'avènement des méthodes

DÉFINITIONS : « OMIQUES » ET TERMES APPARENTÉS

De nouvelles technologies ont permis d'appréhender le monde du vivant, notamment les micro-organismes, avec une efficacité et une vitesse (« un débit ») qui ne cessent d'augmenter, et un coût qui ne cesse de diminuer. Le support de l'information génétique est la double hélice d'ADN structurée en gènes. Ces derniers sont transcrits en ARN, dont les ARN messagers qui sont eux-mêmes traduits en protéines. Ces protéines ont de multiples fonctions (structurales, d'adhésion, de communication, **enzymatiques**, etc.) nécessaires au fonctionnement de la cellule microbienne. Les réactions enzymatiques conduisent à la production de diverses substances liées au métabolisme microbien, dites « **métabolites** » (par ex., des sucres, des acides aminés, des acides gras, etc.). Il est désormais possible d'inventorier l'ensemble des gènes présents dans le génome d'un micro-organisme, voire de tout un écosystème microbien et aussi des ARN, des protéines ou des métabolites produits.

La *génomique* regroupe un ensemble d'analyses qui vont de l'établissement de cartes du génome (cartographie) au séquençage des molécules d'ADN, et de l'identification de nouveaux gènes à l'étude de leurs fonctions. Le génotype d'un micro-organisme est l'ensemble de ses caractères génétiques. On peut le caractériser par le séquençage de l'ensemble des gènes ou se concentrer uniquement sur quelques gènes d'intérêt. La *transcriptomique* est consacrée à l'étude des molécules d'ARN (transcrits) résultant de la transcription des gènes portés par le génome. La *protéomique* étudie l'ensemble des protéines d'un micro-organisme ; cet ensemble de protéines est nommé protéome. La *métabolomique* s'intéresse à l'ensemble des voies métaboliques d'un micro-organisme et des métabolites produits à un temps donné et dans des conditions données. Les *métagénomiques* reprennent les définitions ci-dessus, mais en les appliquant, non plus à des micro-organismes purs (une seule souche), mais à des écosystèmes microbiens (plusieurs espèces occupant une même niche écologique). Ainsi, la *métagénomique* est basée sur le séquençage de l'intégralité des génomes présents dans un écosystème donné (appelée aussi métagénomique *shotgun* [« fusil de chasse »]).

de métagénomique a permis de revisiter la microbiologie des aliments, en particulier celle des aliments fermentés, en mettant en évidence leurs **microbiotes** et les nombreuses interactions entre micro-organismes mises en œuvre lors de leur conservation ou transformation. Les données acquises et les outils disponibles permettent d'envisager le développement de nouveaux aliments fermentés à partir de matières premières plus diverses, d'origine animale, végétale ou mixte.

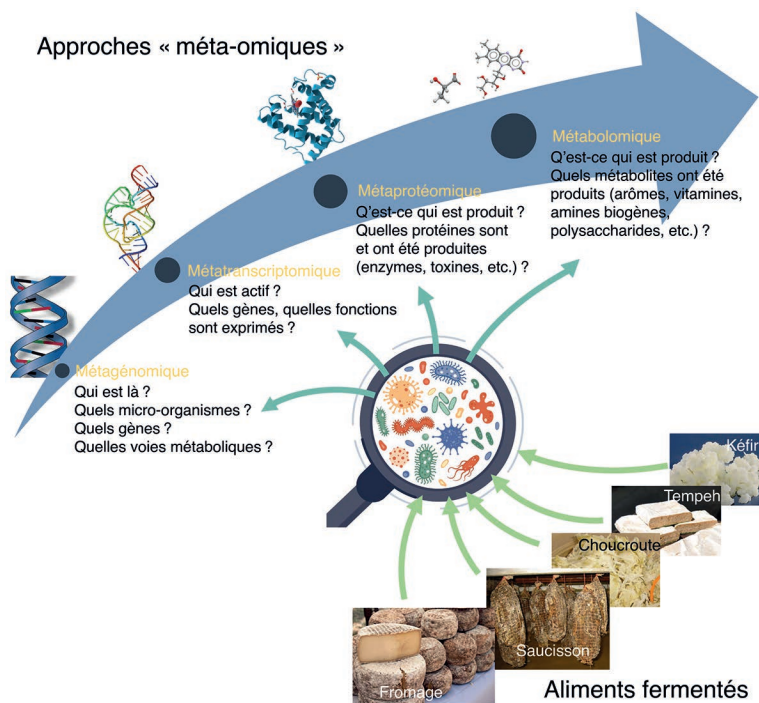


Figure 2. Utilisation des techniques « omiques » pour progresser dans la compréhension des écosystèmes microbiens des aliments fermentés, en améliorer la qualité et développer de nouveaux types d'aliments.

Source : figure de Yves Le Loir, photographies et illustrations :
© -donald-, © Wibiwo Djatmiko, © Alina Zienowicz, © Pierre Bona,
© William G. Scott, © National Human Genome Research, © WinWin.

L'analyse par les techniques « omiques » doit être complétée par celle des phénotypes, c'est-à-dire par les caractères observables d'un micro-organisme, qui dépendent à la fois de l'expression de son génome (ensemble de ses gènes) et de l'environnement dans lequel il se développe (nutriments disponibles, température, O₂, etc.). Le phénotypage consiste à observer le comportement et l'adaptation à telle ou telle condition.

Les aliments fermentés comme les fromages ou les saucissons peuvent être considérés comme des écosystèmes microbiens en constante évolution (on parle de dynamique) lors des étapes de fermentation, d'affinage, de distribution et commercialisation, et ce jusqu'à leur date de péremption. Les questions auxquelles les approches « métaomiques » permettent de répondre sont illustrées en figure 2.

LES OUTILS OMQUES AU SERVICE DES INNOVATIONS DE RUPTURE

Mode de conservation ancestral de denrées alimentaires, la fermentation s'est développée au fil des siècles, de façon empirique, au moins jusqu'à la fin du XIX^e siècle et les travaux de Pasteur. Les technologies « omiques » permettent d'envisager le développement de nouveaux aliments fermentés en s'appuyant sur la biodiversité des micro-organismes. Les biobanques offrent la possibilité de préserver, d'explorer et d'exploiter cette biodiversité microbienne. Des outils bioinformatiques et des bases de données ont été développés pour extraire des connaissances fondamentales à partir des masses de données générées par les « omiques ». Il est ainsi possible de modéliser le fonctionnement des cellules bactériennes dans un contexte alimentaire précis, seules ou en interaction avec d'autres micro-organismes. L'association des données bioinformatiques disponibles et des souches conservées dans des biobanques devrait permettre d'élaborer rationnellement des « cocktails de souches » (*consortia*) capables de fermenter un aliment particulier, qu'il soit d'origine animale, végétale ou mixte, en tenant compte des spécificités et des interactions liées à sa structure et à sa composition, que définit la notion de « **matrice** »

alimentaire ». Ces outils devraient également permettre de sélectionner des ferments ou *consortia* exprimant une fonctionnalité ciblée, comme une propriété organoleptique (produire des arômes particuliers ou, au contraire, masquer certains arômes non désirés), nutritionnelle (produire certaines vitamines ou d'autres composés bioactifs), sanitaire (lutter contre le développement de micro-organismes indésirables), voire bénéfique pour la santé (activités probiotiques).

La culturomique associe culture de micro-organismes et approches à haut débit. Elle permet d'enrichir les biobanques de nouvelles souches de micro-organismes d'intérêt alimentaire. Elle s'effectue par l'isolement, l'identification et le phénotypage très rapide des micro-organismes vivants, pour lesquels on connaît (ou développe) les milieux et les conditions de culture permettant de les exploiter de manière optimale.

LES ALIMENTS FERMENTÉS

Nous nous focaliserons sur la fermentation lactique, mise en œuvre pour la conservation d'aliments d'origine végétale (transformation du chou en choucroute par exemple) ou animale (transformation du lait en fromage, de viande en saucisson sec).

Produits laitiers

Avec du lait, des micro-organismes et quelques ingrédients, il est possible de générer une incroyable diversité de produits laitiers fermentés, allant du yaourt ultrafrais aux fromages les plus affinés. Les différents types de fromages se caractérisent par des teneurs en eau plus ou moins élevées. Ainsi, les fromages à pâte molle (type camembert) ont une teneur en eau élevée, alors qu'elle est très basse dans les fromages à pâte pressée cuite (type comté ou parmesan). Leur durée d'affinage et de garde est inversement proportionnelle à cette teneur en eau : de quelques semaines pour le camembert à trois ans ou plus pour le comté ou le parmesan. Cette diversité des fromages tient aussi à la diversité de leur écosystème microbien, dont la connaissance n'a cessé d'augmenter ces dernières décennies (tableau 3, voir Annexe).

Malgré des siècles de tradition et de savoir-faire fromagers, le lait reste une denrée difficile à maîtriser, aussi fragile que riche. Les technologies laitières et fromagères ont été largement rationalisées grâce aux connaissances acquises, tant sur les constituants du lait que sur les procédés, notamment la fermentation. Les souches peuvent être combinées selon leur capacité à assurer la texturation, les arômes, l'acidification plus ou moins rapide du produit, etc. Une connaissance fine des souches permet aussi d'écarter celles qui sont porteuses de facteurs de risques, tels que des gènes de résistance aux antibiotiques, des copies de génome en dormance de virus attaquant spécifiquement les bactéries, appelés « bactériophages » (ou « phages »), ou encore celles susceptibles de produire des **amines biogènes**.

De nombreuses questions émergent dans le sillon des transitions qui s'opèrent dans le monde de l'agriculture, de l'agroalimentaire et dans la société en général. Ainsi, la transition vers une agriculture plus raisonnée (dont l'agriculture biologique) apporte, par la diversité du cheptel et des pratiques d'élevage (foin, ensilage ou non, 100 % à l'herbe, fourrage et pâturage...), une forte variabilité du lait, qui s'ajoute à celle liée à la saison. Si l'on y ajoute les impacts du changement climatique sur la physiologie des vaches laitières et la composition des laits, on aboutit à des variations d'une ampleur nouvelle. Il en résulte des temps de coagulation très variables, difficiles à maîtriser, et perturbants pour les phases de fabrication des crèmes, yaourts ou fromages. Le développement de ferments plus robustes, capables « d'absorber » ces variations, pourrait contribuer à atténuer ces effets et à limiter les pertes et gaspillages. Un autre exemple provient des attentes des consommateurs en matière de naturalité et de réduction d'additifs, tels que les agents texturants, les antifongiques, etc. Le développement de ferments « 2-en-1 » peut apporter des solutions. Ainsi, des souches de bactéries lactiques ont été sélectionnées sur leur capacité à exprimer une activité antifongique naturelle qui permet de s'affranchir de certains additifs comme le sorbate ou la natamycine utilisés dans la crème fraîche ou l'emmental râpé. Ces bactéries, additionnées aux ferments classiques, produisent des ferments « 2-en-1 » capables d'assurer la fabrication du produit, mais aussi sa conservation et

sa résistance à l'altération fongique. Dans ce cas, la fermentation est conjuguée à la biopréservation. Ce potentiel d'inhibition peut aussi être recherché pour contrer les contaminations par des pathogènes. Les ferments, par l'acidification, contribuent à inhiber la croissance de nombreux pathogènes. Certaines souches de bactéries produisent en outre des **bactériocines**, sortes de toxines antibactériennes ciblant d'autres espèces, dont, par exemple, *Listeria monocytogenes* ou *Staphylococcus aureus*. La nisine (E234), produite par certaines souches de *Lactococcus lactis*, est probablement la mieux documentée des bactériocines et peut être utilisée comme additif pour la préservation des produits laitiers.

Les transitions alimentaires amènent à inclure plus de protéines végétales dans notre alimentation. Les recherches accompagnent ces transitions, par exemple avec le développement de produits mixtes d'origine à la fois animale et végétale. Une part des protéines laitières y est remplacée par des protéines d'origine végétale extraites de plantes riches en protéines, comme les légumineuses par exemple. La fermentation peut, là aussi, jouer un rôle au niveau nutritionnel et/ou organoleptique. Ainsi, des bactéries lactiques judicieusement sélectionnées peuvent éliminer des composés antinutritionnels, tels que les phytates, des acides végétaux **chélateurs** de métaux comme le fer, qui empêchent leur absorption intestinale lors de la digestion. Elles peuvent aussi masquer le goût « herbeux » qu'apporte la fraction végétale lorsqu'elle est en proportion importante et lui substituer une note « lactée ».

Produits carnés

L'historique de la fermentation des produits carnés comme le saucisson sec est bien moins documenté que celui des produits laitiers. Différents types de saucissons secs existent (« Rosette » ou « Jésus » lyonnais, « Fuseau » lorrain, salamis italiens, chorizos espagnols, etc.), dont la variété résulte à la fois de la composition, des viandes et des ingrédients utilisés, du diamètre et des conditions de séchage appliquées. Leurs caractéristiques sont directement en lien avec les ferments microbiens utilisés, le diamètre du produit influençant les conditions plus ou moins anaérobies du

milieu, la température et le temps de fermentation et de séchage influençant la vitesse de croissance des bactéries mises en œuvre. Le rôle des bactéries lactiques est essentiellement de produire de l'acide lactique, tandis que les staphylocoques non pathogènes mis en œuvre contribuent à l'arôme de salaison et à la couleur du produit. Des levures contribuent également à l'arôme et, surtout, à l'aspect de la surface des saucissons. Les ferments utilisés (bactéries lactiques, staphylocoques, levures) sont issus des microbiotes naturels des environnements de production ou des matrices carnées. La demande sociétale portant sur la diminution ou la suppression de l'ajout de nitrites et de nitrates dans les produits de charcuterie, la recherche de nouveaux ferments capables de s'affranchir de l'ajout de ces conservateurs tout en garantissant la salubrité et les qualités organoleptiques des produits reste une piste à investiguer. Comme dans le cas des fromages, la biopréservation peut être conjuguée à la fermentation pour garantir la salubrité du produit et prolonger les temps de conservation.

Produits de la mer

Peu présents sur le marché français, plusieurs produits de la mer issus de la fermentation existent dans d'autres pays. Dans les pays nordiques, le *rakfisk* ou le *surströmming*, par exemple, résultent de la fermentation naturelle et spontanée (sans ajout de ferments) de poissons dans des saumures. La chair de poisson étant, comme la viande, peu riche en glucides, la fermentation peut être accélérée par l'ajout de sucre. Les produits fermentés à base de poissons présentent des arômes puissants. C'est pourquoi plusieurs condiments sont issus de poissons longuement fermentés en présence de sel, comme le *nuoc-mâm* au Vietnam, préparé à base d'anchois, ou le *jeotgal* en Corée, préparé à partir de divers produits de la mer. Ce type de produits est susceptible de contenir des amines biogènes, responsables de l'altération des qualités organoleptiques ou dangereuses pour la santé humaine. En conséquence, la recherche de nouveaux ferments capables de dégrader les amines biogènes ou d'inhiber leur synthèse serait à envisager.

Produits végétaux : céréales, légumes et légumineuses

Les fermentations végétales font partie intégrante de la diète des pays asiatiques, qui possèdent un savoir-faire et une réelle tradition en ce domaine. Elles sont émergentes ou ré-émergentes en Europe. En effet, depuis quelques années, il y a un véritable engouement pour la lactofermentation, qui permet une conservation des légumes sans les changements induits par la cuisson, et qui ne nécessite pas de ferment commercial (la fermentation est spontanée, à partir des bactéries naturellement présentes sur les légumes). La lactofermentation se déroule à température ambiante et le procédé ne consomme pas d'énergie, contrairement à la congélation ou à la cuisson, mais le produit doit souvent être conservé au froid.

Hormis quelques aliments (choucroute, olives, etc.), les habitudes et les goûts culinaires européens sont peu portés sur les végétaux lactofermentés, qui restent encore souvent de simples accompagnements de produits carnés. C'est une option intéressante pour mieux satisfaire les attentes sensorielles et augmenter ainsi la part végétale des repas. De nouvelles connaissances concernant les aliments fermentés traditionnellement, notamment en Asie, pourraient être précieuses pour développer de nouveaux aliments végétaux répondant aux défis de la transition alimentaire en France et en Europe.

Une grande variété de légumes à feuilles (choux), de tubercules (radis, betteraves), de concombres ou cornichons, de jeunes pousses de bambou ou encore d'olives font l'objet de fermentations traditionnelles en Asie (*kimchi* coréen) ou en Europe (pickles britanniques, choucroute); certaines bénéficient même d'appellations contrôlées (olives de Nyons). Les microbiotes de certains de ces légumes lactofermentés ont fait l'objet d'un inventaire exhaustif (tableau 3, voir Annexe). D'autres spécialités telles que le *sinkhi* (radis fermentés), le *goyang*, l'*inziang-sang* et le *gundruk* (feuilles de légumes verts fermentées) ainsi que le *khalpi* (pickle de concombre) sont traditionnellement produites et consommées dans certaines régions d'Inde, du Népal et des pays environnants. Les espèces de bactéries associées à ces fermentations sont semblables à celles retrouvées dans le *kimchi* et la choucroute. Il en est de même pour les produits

issus de fermentations de pousses de bambou consommées dans de nombreux pays asiatiques.

Le soja est une légumineuse cultivée pour sa richesse en protéines, largement consommée dans le monde. Il peut être fermenté, soit sous forme de graine entière, soit sous forme de protéines solubilisées et gélifiées (*tofu*). Les spécialités comme le *natto* japonais, et bien d'autres en Asie (tableau 3, voir Annexe), sont des aliments à base de graines de soja fermentées, non salés et collants. Ils doivent souvent être conservés au froid, comme le *natto*, qu'il est conseillé, en Europe, de placer au réfrigérateur à réception et de consommer sous trois jours. Bien que plusieurs espèces de *Bacillus sp.* soient décrites dans ces aliments asiatiques à base de soja fermenté, *B. subtilis* y est la bactérie fonctionnelle dominante. Le *natto* est produit à l'aide d'un ferment commercial en monoculture, *Bacillus natto*, isolé de *natto* naturellement fermenté au début du ^{xx}e siècle. À l'inverse, le *miso* du Japon, le *tempeh* d'Indonésie et d'autres spécialités asiatiques sont des aliments à base de graines de soja fermentées dont le microbiote est dominé par des moisissures filamenteuses. Ils sont salés et se présentent sous la forme de pâte épaisse ou de gâteau (de graines de soja dans le *tempeh*) dont la saveur peut être forte selon le degré et la méthode de fermentation. Des légumineuses autres que le soja sont aussi fermentées en Afrique et utilisées comme aliments ou condiments (tableau 3, voir Annexe). Enfin, le *tofu* peut lui aussi être fermenté pour donner des produits au goût puissant (*sufu*), très salés et fermentés par des moisissures, principalement du genre *Mucor*, utilisés comme condiment.

En ce qui concerne les produits céréaliers, le riz occupe une place importante dans la diète de nombreux pays asiatiques. Il n'est toutefois fermenté, en utilisant des cultures mixtes, que pour la production de boissons alcoolisées ou alimentaires. En Afrique, les aliments à base de céréales fermentées constituent la base de l'alimentation traditionnelle. Elles sont aussi produites comme aliments complémentaires et de sevrage pour les nourrissons et les jeunes enfants. En Europe et en Amérique, le blé est la céréale majoritaire et constitue une matière première pour de nombreuses fermentations, qu'elles soient naturelles ou réalisées par l'ajout de levure de boulangerie commerciale

(*Saccharomyces cerevisiae*), notamment dans la pâte à pain. Dans la diète occidentale actuelle, la préparation de pain s'effectue par des levures et levains préparés par des entreprises spécialisées, certains boulangers préférant néanmoins entretenir et nourrir leurs propres levains. Dans ce cas, la fermentation n'implique que les levures (majoritairement, *Saccharomyces cerevisiae*) et les bactéries lactiques naturellement présentes dans le levain (tableau 3, voir Annexe). Les pains au levain ont généralement des teneurs plus élevées en acide lactique et en acide acétique du fait de la fermentation lactique qui complète l'action des levures. Les microbiotes des levains ont une certaine typicité liée à l'atelier et contribuent à l'arôme et aux qualités nutritionnelles des pains.

De nombreuses racines et tubercules entrent dans la composition de produits fermentés traditionnels en Afrique, au premier rang desquelles le manioc (*Manihot esculenta*), qui est traditionnellement fermenté puis séché pour éliminer les substances précurseurs de cyanure qu'il contient. La première phase de fermentation du manioc est dominée par une grande diversité de bactéries lactiques (tableau 3, voir Annexe). En Asie, le *tapé* indonésien est un dessert sucré traditionnel à base de racine de manioc fermentée.

Les aliments fermentés ont également la faveur des consommateurs car ils sont réputés bons pour la santé. Ils seraient notamment source de bactéries lactiques qui enrichiraient le microbiote intestinal. Bien que certains travaux suggèrent que la consommation d'aliments fermentés puisse être bénéfique pour la santé humaine, dans la plupart des cas, les bactéries alimentaires ne persistent pas dans l'intestin humain. Ces effets sont donc le plus souvent transitoires.

DÉVELOPPEMENT DE LA BIOPRÉSERVATION

Les questions de recherche posées et les approches scientifiques utilisées pour développer la biopréservation sont similaires à celles qui émergent pour développer la fermentation. Différents mécanismes peuvent contribuer à un effet protecteur des micro-organismes. La production de molécules bactéricides (qui tuent

les bactéries cibles) ou bactériostatiques (qui empêchent ou ralentissent la croissance) est le plus fréquent et le mieux connu. La plupart des études concernent la lutte contre différentes bactéries pathogènes, en particulier *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* ou *Escherichia coli*, susceptibles de contaminer différents aliments, essentiellement d'origine animale. L'utilisation de souches productrices de bactériocines actives contre ces différents pathogènes est bien documentée. D'autres molécules à effet bactériostatique sont également bien connues, comme des acides organiques (acide lactique, acide acétique) qui, outre leur capacité à diminuer le pH, inhibent la croissance de certains micro-organismes. La production de peroxyde d'hydrogène par des souches protectrices a aussi été étudiée. Un second mécanisme, plus complexe, concerne la compétition pour les substrats, qui permet aux souches protectrices de se développer au détriment d'espèces cibles.

La mise en œuvre de la biopréservation est en général complexe. Elle est souvent associée à la fermentation des produits laitiers ou carnés,ensemencés par des ferments et des cultures protectrices qui sont majoritaires à la fin de la transformation. En revanche, la lutte contre l'altération microbienne des aliments non fermentés reste un défi à relever. Cette altération est très variable, car elle dépend de la nature de l'aliment substrat et du métabolisme microbien (viande, poisson, lait ou végétal), des procédés de fabrication (découpe, hachage, tranchage, etc., qui représentent des étapes de contamination potentielle) et de conservation (température, utilisation d'atmosphères protectrices variées), ainsi que de la nature du microbiote initial. Pour certains aliments, une grande variabilité existe d'un lot à l'autre, ce qui a conduit à des résultats parfois contradictoires, des résultats robustes ne pouvant être obtenus qu'au travers d'un large échantillonnage. Les mécanismes qui conduisent à l'altération des aliments sont en effet multiples et souvent mal connus. Enfin, lorsque la biopréservation est utilisée seule, les souches protectrices sélectionnées ne doivent pas altérer les qualités organoleptiques du produit final, ce qui sous-entend qu'elles ne doivent pas se développer au-delà d'une certaine quantité.

Pour développer la biopréservation des produits alimentaires, il est essentiel de surmonter les obstacles liés au manque de connaissance des mécanismes de l'altération, en particulier des aliments non fermentés. En France, différents projets de recherche ont abordé l'amélioration de la biopréservation pour les filières laitière, carnée, végétale et de la mer. Ils visaient à produire des connaissances sur les microbiotes des aliments et à mieux comprendre les mécanismes aboutissant à l'altération bactérienne. Ils ont montré qu'il est nécessaire de considérer les aliments comme des écosystèmes complexes et dynamiques : les microbiotes des aliments sont divers, les micro-organismes y interagissent entre eux et avec la matrice alimentaire. Une meilleure connaissance des micro-organismes altérants offre des cibles pour le criblage de souches inhibitrices candidates et le développement de flores de biopréservation. La compréhension des interactions entre les matrices et les micro-organismes qui les altèrent permet d'orienter la sélection des souches protectrices, qui doivent exprimer une activité inhibitrice, mais ne pas (ou très peu) interagir avec les constituants de la matrice pour ne pas l'altérer.

L'absence d'un cadre législatif clair sur le statut des cultures protectrices ajoutées intentionnellement aux aliments pour les biopréserver constitue un frein au développement de ces méthodes. Ainsi, sauf dans le cadre des aliments fermentés, qui indiquent aux consommateurs l'ajout de ferments, il n'existe pas de termes spécifiant l'ajout de cultures protectrices. Seuls certains produits carnés régis par le code des usages font mention de l'ajout de cultures protectrices, généralement sous le terme « ferments » ou « ferments lactiques ». Il s'agit d'un obstacle pour les transformateurs d'aliments qui ne savent comment étiqueter leurs produits.

MICROBIOTES DES ALIMENTS : DE NOUVELLES ESPÈCES EN LIEN AVEC L'ALTÉRATION OU LA PRÉSERVATION DES ALIMENTS

Au début des années 2000, le développement de nouvelles technologies de séquençage a permis d'explorer de nombreux écosystèmes de façon exhaustive et sans *a priori*, dont des

écosystèmes d'aliments, qu'ils soient fermentés ou non. Ces travaux ont généré un inventaire des espèces présentes, bien plus vaste que celui qui existait précédemment. Les technologies omiques donnent également accès aux fonctions portées par les microbiotes en identifiant l'ensemble des gènes qu'ils contiennent. Grâce à la métatranscriptomique, elles mettent en évidence ceux qui sont effectivement exprimés par le microbiote de l'aliment. Cela pourrait s'appliquer aux fonctions impliquées dans la fermentation, la biopréservation ou l'altération de matrices alimentaires spécifiques (d'origine animale ou végétale), et ce à chaque étape du procédé, par exemple au début de la fermentation ou, au contraire, durant l'affinage. Les exemples ci-dessous illustrent la possibilité de découvrir de nouvelles espèces de bactéries utilisées en biopréservation associées à de nouvelles fonctions.

Des études ont mis en évidence la présence de bactéries **halotolérantes**, pour partie d'origine marine, à la surface de certains fromages, apportées par le sel marin utilisé pour l'étape de saumurage (par exemple, Kothe, 2021). De manière similaire, une espèce de *Vibrio* inconnue a été détectée dans des jambons cuits, elle aussi vraisemblablement apportée par le sel de la saumure. Enfin, la combinaison de différentes méthodes « omiques » a mis en évidence l'impact de différents procédés de fabrication sur la présence et le développement de bactéries altérantes de saucisses de porc et de dinde. L'implication de bactéries lactiques dans l'altération, par la production de différentes molécules volatiles indésirables, a pu être mise en évidence. Enfin, il a été montré que la nature des découpes de viande utilisées pour la fabrication de saucisses peut favoriser l'émergence de certaines espèces bactériennes. En particulier, une bactérie lactique altérante (*Dellaglistia algida*) s'est avérée favorisée par certains types de découpe. Cette bactérie est rarement détectée par les méthodes culturales usuelles. En effet, elle échappe aux dénombrements classiques, car elle nécessite des conditions de culture particulières en raison de sa croissance au froid et de sa sensibilité au stress oxydant.



DES ACTIVITÉS BACTÉRIENNES À CONTRÔLER

La fermentation empêche la croissance de micro-organismes pathogènes ou responsables d'altération. Mais une fermentation trop poussée peut provoquer l'apparition de défauts de flavour, liés à un excès d'acide ou d'alcool, à des dégradations des lipides ou des protéines trop importantes, générant un goût de rance et des peptides amers. De même, la biopréservation peut agir sur une ou plusieurs composantes du microbiote de l'aliment et rompre l'équilibre de l'écosystème microbien. Développer de nouveaux produits fermentés ou biopréservés est donc un réel défi. Il est nécessaire d'intégrer les attentes des consommateurs, les effets nutritionnels et les effets sur la sécurité sanitaire des microbiotes **endogènes** des aliments, dont les interactions sont multiples et complexes. Malgré les progrès scientifiques de la dernière décennie, il faut admettre que connaître et comprendre ne signifient pas immédiatement maîtriser. Or, les procédés (dans le sens d'enchaînement d'opérations unitaires telles que traitement thermique, filtration, concentration, etc.) constituent un levier important de contrôle et de pilotage des écosystèmes microbiens, soit pour les éliminer (microfiltration ou traitement à haute température), soit pour orienter leur évolution et leur dynamique (atmosphère contrôlée, température d'incubation). La fabrication des fromages à pâte pressée cuite est emblématique de ce pilotage de l'écosystème fromager par le procédé (principalement la température et le pressage qui augmentent l'extrait sec final, voir encadré *infra*).

L'anaérobiose (absence d'O₂), qui peut être plus ou moins poussée, est une alternative à la température pour contrôler les écosystèmes microbiens. La mise en forme des produits est un moyen simple et traditionnel de moduler cette anaérobiose. Par exemple, de par leur épaisseur lors de la mise en boyaux, les salamis conduisent à une anaérobiose beaucoup plus poussée au sein du produit que d'autres types de saucissons de plus petit diamètre. Lors du conditionnement des produits sensibles aux contaminations et au développement bactérien, une flore bioprotectrice peut être inoculée à la surface des aliments. Sa croissance peut être favorisée par un conditionnement sous atmosphère

LA TEMPÉRATURE, PRINCIPAL LEVIER DE PILOTAGE DU MICROBIOTE DANS LA FABRICATION DES FROMAGES À PÂTE PRESSÉE CUITE

Avant collecte, le lait est réfrigéré (4 à 5 °C), ce qui stoppe la croissance des micro-organismes endogènes du lait cru, voire favorise la croissance des micro-organismes qui croissent à basse température. Il est ensuite mûré etensemencé à l'aide de levains lactiques thermophiles, comme *Streptococcus thermophilus* ou *Lactobacillus helveticus*, dont la température de croissance optimale est voisine de 40 °C, et de levains **propioniques**, dont la température optimale de croissance est de 31 à 34 °C. À cette température, les ferments lactiques croissent et acidifient le milieu. Cette étape, accompagnée de l'ajout de présure (initialement prélevée à partir de la caillotte de veau), aboutit à la formation du caillé. Ce dernier subit une « cuisson » à 53-54 °C pendant une heure, ce qui élimine les bactéries qui se développent entre 20 et 40°C, dont certaines bactéries pathogènes ou responsables d'altération. Une fois découpé et moulé, le caillé est pressé, pour faciliter le drainage du lactosérum, puis salé (trempage dans une saumure). Ces deux étapes, drainage et salage, diminuent l'activité de l'eau du produit et sélectionnent drastiquement les micro-organismes de l'écosystème fromager. Commence alors l'affinage, dont les séquences et températures peuvent varier selon le fromage. Pour l'emmental, celui-ci débute en cave froide (14 °C) pendant 1 à 3 semaines. Il se poursuit en cave chaude (autour de 25 °C) pendant 3 semaines, et se termine en cave froide (12 °C) pendant le temps nécessaire au degré d'affinage désiré. Les températures initiales sélectionnent d'abord les bactéries lactiques thermophiles, puis les passages en caves tempérées et chaudes favorisent la croissance des bactéries propioniques (dont *Propionibacterium freudenreichii*). Ces dernières consomment le lactate produit par les bactéries lactiques (dont la population chute fortement), pour générer du propionate, de l'acétate et un dégagement de CO₂ responsable de l'ouverture des meules (formation « des yeux » de l'emmental).

protectrice, composée de mélanges de différents gaz, tels que le N_2 , l' O_2 ou le CO_2 , en proportions variables selon les produits.

LA FERMENTATION, SOURCE D'INNOVATIONS ET DE RUPTURE

De nombreux travaux explorent les possibilités de la fermentation pour l'élaboration de produits totalement innovants. Le recours à la fermentation est en effet un levier possible pour valoriser des coproduits, pour réduire les pertes et gaspillages, ainsi que pour assurer la transition alimentaire vers une alimentation plus végétale et plus durable.

Les microalgues et les bactéries qui se développent en milieu aquatique en pratiquant la photosynthèse, telles que les chlorelles et spirulines, sont produites par des procédés biotechnologiques proches des fermentations. Elles font l'objet d'une attention particulière du fait de leurs qualités nutritionnelles, notamment leur profil lipidique et leur teneur en protéines. Elles sont associées avec des lactobacilles lors de fermentations alimentaires. Les bactéries lactiques les plus couramment utilisées à ces fins sont les lactobacilles et les streptocoques du yaourt, mais on retrouve aussi d'autres lactobacilles, des lactocoques, des *Weissella spp.* et des *Leuconostoc spp.* Dans certains cas, les microalgues sont utilisées en poudre et additionnées aux matières premières à fermenter (lait, jus de soja, lait d'amande, kéfir) pour les enrichir et améliorer la fermentation par les levains lactiques, comprenant ou non des probiotiques. Les produits finis se présentent alors sous la forme de laits fermentés, yaourts ou fromages (type labneh, feta), voire de kéfir de lait ou de fruits (cette appellation n'étant pas légale). Dans d'autres cas, les microalgues constituent à elles seules la matière première fermentescible. Les produits finis sont alors des préparations vectrices de probiotiques. Dans tous les cas, la combinaison de microalgues et de ferments lactiques est utilisée pour ses propriétés fonctionnelles (meilleure croissance microbienne, meilleure acidification, production d'acide L-lactique, d'acide phényllactique, activités enzymatiques microbiennes accrues, meilleur

arôme) ou pour ses bénéfices sur la santé (activités antioxydantes, meilleure digestibilité, valeur nutritionnelle accrue).

Un autre champ d'application de la fermentation est celui des analogues aux produits laitiers, de type yaourts ou fromages. Il est désormais possible de consommer des produits étiquetés «vromages» ou des «yaourts végétaux», ayant pour ingrédients principaux des isolats ou concentrats de végétaux riches en protéines et en matières grasses, qui permettent d'apporter une texture proche de celle des fromages et yaourts entièrement à base de lait. Contrairement aux légumes lactofermentés, pour lesquels la fermentation est spontanée et ne requiert aucun ensemencement, les matrices végétales subissent ici plusieurs prétraitements, dont une étape de chauffage qui est souvent nécessaire à la coagulation des protéines végétales. Ces prétraitements éliminent aussi des micro-organismes endogènes, et rendent nécessaire un ensemencement par des ferments exogènes. Il est alors tentant de recourir aux ferments classiquement employés dans les technologies laitières (fromage et yaourt), qui ont été sélectionnés pour leurs performances technologiques (acidification, texture, arôme, etc.). Pourtant, force est de constater qu'ils ne fonctionnent pas, ou nettement moins bien, lorsqu'on les sort du lait ! À cela, plusieurs raisons. En premier lieu, les sucres fermentescibles végétaux sont beaucoup plus nombreux et variés que l'unique sucre du lait : le lactose. Or, les ferments lactiques sélectionnés pour l'industrie laitière ont perdu la capacité de fermenter d'autres sucres que le lactose. Il faut donc rechercher, dans les collections de micro-organismes, de nouvelles souches capables de transporter et de fermenter les sucres végétaux (saccharose, raffinose, stachyose, mélibiose, etc.) pour obtenir une acidification correcte, indispensable à la préservation et à la transformation de ces matrices végétales. D'éventuels facteurs antinutritionnels, des notes herbeuses (hexanal), d'éventuels allergènes, etc., peuvent être éliminés par la fermentation. Les ferments doivent aussi être adaptés à la nature des protéines végétales et capables d'assurer leur digestion partielle pour texturer convenablement ces produits, voire éliminer certaines protéines potentiellement allergènes.

D'un point de vue microbiologique, toutes ces nouvelles matrices végétales peuvent introduire des contaminants (micro-organismes



ou toxines produites par ces micro-organismes), tels que l'ergot de seigle, des **mycotoxines**, etc., qu'il est nécessaire d'éliminer. La sélection de ferments peut apporter des solutions, comme l'ont montré plusieurs travaux récents, par exemple sur des bactéries lactiques dégradant les mycotoxines.

La fermentation peut aussi répondre à la demande sociétale forte pour une alimentation contenant moins (ou plus du tout) d'additifs alimentaires (mouvance *clean label*, « 100 % naturel »). Le développement de levains fermentaires, bioprotecteurs et producteurs de bactériocines pourrait pallier la réduction, ou la suppression, de l'ajout de conservateurs ou texturants, ces derniers étant produits *in situ*.

L'emploi de bactériophages constitue une autre solution envisageable pour éviter les contaminations par des bactéries pathogènes. Ces phages ont un spectre d'action très étroit et attaquent le plus souvent des bactéries d'une seule espèce ou d'espèces très proches. Ainsi, la commercialisation de préparations de phages, capables d'attaquer et tuer des *Listeria* dans des matrices alimentaires, est autorisée dans certains pays. Ces phages n'ont pas d'activité métabolique propre et peuvent ainsi être utilisés en plus des ferments lactiques pour la protection d'aliments fermentés. Par leurs attaques ciblées, ils constituent une solution de lutte biologique pour prévenir les contaminations par des bactéries pathogènes sans altérer la viabilité et l'activité des ferments.



EST-IL POSSIBLE D'IMAGINER DES PROCÉDÉS THERMIQUES PLUS DURABLES ?

La conservation des aliments implique deux aspects : le procédé de stabilisation (inactivation des **enzymes** et des micro-organismes, ralentissement des réactions chimiques ou physiques, etc.) et les modes de stockage et d'emballage qui suivent cette stabilisation. Ce couple est interdépendant : une congélation implique une conservation en température négative alors que la **stérilisation** permet une conservation à température ambiante si l'emballage est étanche (voir tableau 1). La durabilité et l'impact environnemental des procédés doivent être analysés, pas seulement en sortie d'usine, mais sur toute la chaîne de transformation, de distribution et de conservation, c'est-à-dire jusqu'à l'assiette du consommateur. Cette analyse doit notamment tenir compte des durées de stockage chez les différents acteurs de la chaîne, ainsi que des gaspillages qui ont lieu à chaque étape.

Développer des procédés de conservation plus durables demande de faire des économies d'énergie et d'eau, ainsi que d'utiliser des énergies renouvelables. Les industriels se sont déjà engagés dans cette démarche, avec des approches qui n'appellent pas forcément de nouvelles questions de recherche. Elles présentent néanmoins des limites liées aux méthodes d'évaluation de la durabilité, aux principes physiques et chimiques sur lesquels les procédés sont fondés ou aux conséquences que peuvent avoir les modifications envisagées sur les qualités des produits alimentaires.

Ce chapitre se focalise sur les procédés de conservation des aliments qui mettent en jeu la production de chaleur ou de froid, car ce sont les plus utilisés dans l'industrie et sont très consommateurs d'énergie et d'eau. Il présente l'évaluation de la durabilité des procédés, qu'il n'est pas toujours simple de quantifier, et donne des pistes pour l'améliorer.

OPTIMISER LA CHALEUR DANS LA STÉRILISATION ET LA PASTEURISATION

Les consommateurs ont une demande de plus en plus affirmée pour des produits transformés qui préservent les qualités **organoleptiques** et nutritionnelles des produits frais, tout en garantissant une sécurité sanitaire optimale. Les produits sont donc souvent **pasteurisés** ou stérilisés par la chaleur, en limitant leur degré de cuisson, de manière à maintenir au mieux les caractéristiques qu'ils ont à l'état frais. Les méthodes et les moyens utilisables dépendent de la nature et de la composition du produit alimentaire, de son pH et de sa texture, notamment son état liquide ou solide.

Stérilisation ou pasteurisation en échangeurs des produits liquides ou faiblement visqueux

Les produits liquides ou faiblement visqueux peuvent être chauffés directement dans des échangeurs qui, en fonction de leur configuration, sont dits « à plaques » ou « tubulaires ». Le produit, en couche fine, passe le long d'une paroi chaude, puis est directement versé dans son emballage. Il peut s'agir de l'emballage final, avec une exigence forte de transfert aseptique pour éviter toute recontamination. C'est la méthode employée pour les produits commercialisés en brique (lait UHT, soupes, jus de fruit **flash-pasteurisés**). Il est en effet possible d'utiliser des températures élevées pour des temps courts et de préserver ainsi les qualités nutritionnelles et sensorielles proches du produit frais. Par exemple, 3 secondes à 150 °C sont suffisantes pour stériliser du lait UHT et 15 secondes à 90 °C pour pasteuriser du jus de pomme.

De nombreux progrès ont été réalisés dans la conception et la mise en œuvre des échangeurs, mais ceux-ci tendent encore à s'encrasser du fait de l'accumulation des dépôts au contact des parois qui servent à l'échange. Cet encrassement, en plus d'héberger des micro-organismes pathogènes, perturbe l'écoulement du fluide, nécessitant ainsi plus d'énergie pour le faire circuler. Il peut aussi modifier les températures, ce qui affecte l'efficacité de l'échange, et entraîner des modifications de la saveur du

produit. L'échangeur doit donc être nettoyé périodiquement pour des raisons d'hygiène et d'efficacité. Ces opérations sont consommatrices de temps et d'eau. En outre, elles mettent en jeu des produits chimiques potentiellement nocifs pour l'environnement. Les rendre plus durables vise donc à la fois à limiter et à mieux détecter les phénomènes d'encrassement, ce qui conduit à des recherches pour développer de nouveaux matériaux et de nouveaux capteurs.

Stérilisation et pasteurisation en autoclave de produits emballés : traitements classiques et optimisations possibles

Le traitement par la chaleur des produits alimentaires préemballés, solides ou pâteux, pose plus de problèmes que celui des produits liquides. Ces produits sont souvent traités dans des enceintes fermées de type **autoclaves** pour garantir une homogénéité maximale du procédé.

Le traitement en autoclave consiste à chauffer un ensemble de produits préemballés par de la vapeur d'eau sous pression afin d'inactiver les micro-organismes qu'ils contiennent et les rendre ainsi stables et sûrs. Les produits sont en général traités en lots et de manière discontinue dans des enceintes de grande taille. Il faut donc d'abord chauffer l'enceinte et l'extérieur des produits avant que la chaleur ne puisse se propager à l'intérieur de chacun des produits emballés.

La figure 3 schématise l'historique des températures, dans un autoclave et au centre du produit, au cours d'un traitement en lot. Quatre phases se succèdent : (1) une montée en température de l'enceinte jusqu'à la température désirée ; (2) un palier chaud durant lequel la température (T_r) est maintenue constante ; (3) une diminution en température de l'autoclave jusqu'à atteindre la température de l'eau ayant servi au refroidissement ; (4) un palier de refroidissement. Chacune de ces phases est caractérisée par une durée, le temps de montée en température étant nommé en anglais « Come Up Time » (CUT). Au cours de ces traitements thermiques, les produits subissent une forte hétérogénéité de chauffage entre leur centre et leur périphérie, ce qui peut affecter leurs caractéristiques organoleptiques.

Plusieurs historiques de température peuvent être choisis en fonction du type d'appareil et de produit, ainsi que des performances attendues. Les concepts de valeur stérilisatrice ou pasteurisatrice acquises (F_0), qui représentent l'effet de l'intensité cumulée du traitement thermique sur l'inactivation des micro-organismes ciblés, sont utilisés pour comparer des traitements menés à différentes températures. La valeur stérilisatrice, qui cible en particulier l'inactivation des spores de *Clostridium botulinum*, s'exprime en «équivalent en minutes passées à 121,1 °C» ; par exemple, une valeur stérilisatrice de 8 minutes au centre du produit peut être acquise au cours d'un traitement à 115 °C pendant un temps relativement long ou, au contraire, lors d'un cycle à 125 °C plus court, tout en obtenant le même effet.

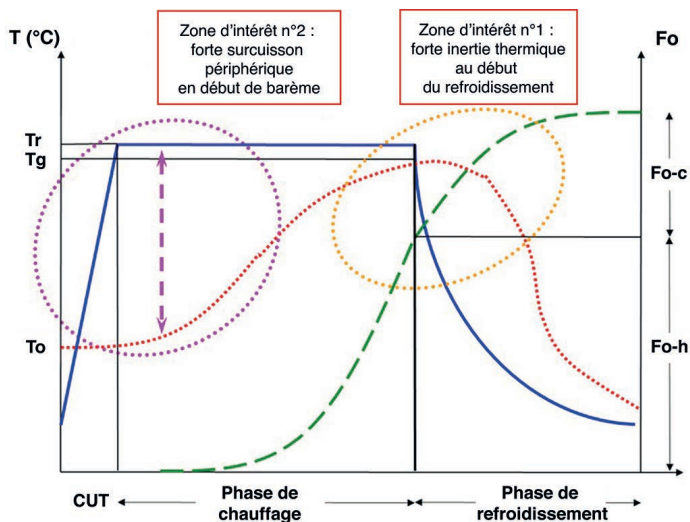


Figure 3. Cycle thermique classiquement utilisé pour le traitement des conserves en autoclave.

En bleu : température dans l'autoclave ; en pointillé rouge : température au centre du produit dans son emballage final (consERVE) ; en pointillé vert : F_0 . T_r : température réelle dans l'autoclave ; T_g : température de consigne du palier chaud ; T_0 : température initiale ; F_0 : valeur stérilisatrice ou pasteurisatrice cumulée acquise à cœur au cours du cycle ; F_{0-c} : valeur stérilisatrice acquise après la phase de refroidissement ; F_{0-h} : valeur stérilisatrice acquise après la phase de chauffage ; CUT : Come Up Time. Source : figure de François Zuber.

Lors de la stérilisation thermique d'un produit solide ou pâteux, le point le plus froid est localisé au centre du produit et l'hétérogénéité de température est plus importante que pour un produit liquide. La courbe d'évolution de la température au centre du produit (pointillé rouge sur la figure 3) présente une forte inertie par rapport à celle de l'autoclave, tant au chauffage qu'au refroidissement. Jusqu'à 50 % de la valeur stérilisatrice totale peut être acquise durant la phase de refroidissement (zone d'intérêt n° 1, figure 3). Pour exploiter cette inertie thermique, il convient d'arrêter le chauffage bien avant que la valeur stérilisatrice au centre du produit n'atteigne la valeur souhaitée. Une deuxième zone d'intérêt (n° 2, figure 3) est située au début du traitement thermique, durant lequel la température périphérique du produit atteint rapidement la température de l'autoclave, avec un fort effet de surcuisson périphérique, qui consomme un excès d'énergie et peut dégrader la qualité sensorielle du produit. La question est donc de savoir comment optimiser le procédé pour améliorer l'uniformité de pénétration de la chaleur dans le produit solide, diminuer le temps de traitement et la consommation d'énergie, tout en améliorant sa qualité.

Plusieurs pistes existent pour améliorer le traitement en autoclave. Le produit lui-même est le premier contributeur au calcul du traitement thermique du fait de trois facteurs essentiels : sa charge microbienne initiale, la géométrie de son emballage et la vitesse de pénétration de la chaleur vers le point le plus froid.

Diminuer l'objectif de réduction microbienne

Le produit doit, avant traitement thermique, présenter la meilleure qualité microbiologique possible, en particulier en ce qui concerne les flores bactériennes qui forment des spores thermorésistantes. Il faut donc que les produits agricoles soient les moins contaminés possibles à la récolte (moins de terre !), puis prétraités (lavage avec biocides et sporicides). Il faut appliquer pour cela de bonnes pratiques d'hygiène dans les usines, veiller à la conception hygiénique des équipements, et pratiquer un nettoyage ainsi qu'une désinfection des lignes de production avec un sporicide. Il est aussi possible de réduire la thermorésistance des flores ciblées en acidifiant le produit. En effet, la

thermorésistance des spores des micro-organismes d'altération peut être diminuée quasiment de moitié en réduisant le pH de 6,5 à 4,8 par ajout d'un peu d'acide citrique, sachant que lorsque le pH devient inférieur à 4,5, la germination des spores est inhibée. Une simple pasteurisation devient alors suffisante pour stabiliser les produits et les conserver à température ambiante.

Améliorer la pénétration de la chaleur dans les produits durant leur traitement

Une première approche simple et efficace consiste à choisir un conditionnement adapté. La pénétration de chaleur est plus rapide lorsque l'emballage présente un fort rapport surface/volume, des formes plates plutôt que compactes comme des cylindres. Il faut toutefois évaluer le gain réel de productivité en comparant les charges d'autoclave possibles par cycle, selon la durée de chaque cycle, la manutention requise et les automatisations possibles. Une autre solution consiste à rendre le produit plus fluide pour y forcer les mouvements convectifs. Il est ainsi possible de formuler des sauces et des jus en utilisant des ingrédients qui favorisent les écoulements à chaud et une reprise de viscosité à froid, par exemple des mélanges d'amidon spécifiques et de gomme xanthane. La pénétration de chaleur est aussi accélérée lorsqu'un produit suffisamment fluide est agité par rotations axiales ou par secousses. Cela permet de réduire le temps de traitement d'un facteur de 2 à 3 pour de nombreux produits.

Pour améliorer encore l'efficacité énergétique, décarboner les procédés et obtenir des produits stabilisés avec de meilleures qualités organoleptiques, il faut choisir d'autres procédés thermiques. Ne plus, comme dans l'autoclave, chauffer le produit et son emballage de l'extérieur vers l'intérieur, mais utiliser des phénomènes électriques ou électromagnétiques pour le chauffer «de l'intérieur». Pour cela, deux approches peuvent être proposées: le chauffage électrique, ou **ohmique**, des produits pâteux, et le chauffage par des micro-ondes d'aliments préemballés solides ou pâteux.

Le chauffage ohmique est une technologie de stérilisation et de pasteurisation déjà utilisée pour des soupes, des préparations de fruits et de légumes ou certains plats cuisinés. Il s'applique

à des produits alimentaires suffisamment fluides pour pouvoir circuler dans une canalisation par pompage. Le chauffage est effectué en continu lors de la circulation du produit, puis est suivi de son conditionnement aseptique dans un emballage préalablement stérilisé. La génération de chaleur à l'intérieur de l'aliment, liée à sa résistance électrique, est obtenue en faisant circuler l'aliment dans un tube isolant électriquement, équipé d'électrodes annulaires à ses extrémités. Celles-ci génèrent un courant électrique alternatif à haute fréquence avec une forte différence de potentiel (250 à 6 000 Volts). Le chauffage ohmique a l'avantage de chauffer l'aliment dans tout son volume, de manière très intense et rapide (vitesse d'échauffement de 3 à 5 °C par seconde), et surtout de façon homogène, y compris pour les produits de forte viscosité comprenant des particules solides. Lorsque le traitement est appliqué à haute température et sous pression, il peut être de courte durée. Il est ainsi possible de stériliser le produit à des températures comprises entre 125 et 135 °C et des temps de l'ordre de la seconde, ce qui limite fortement l'impact du traitement sur la qualité du produit.

Le chauffage ohmique basé totalement sur l'électricité a un rendement énergétique très élevé et peu de pertes thermiques. Son empreinte carbone est donc plutôt favorable, rapportée au kilo de produit fini. Cependant, les étapes de « nettoyage en place » des équipements tubulaires continus nécessitent beaucoup d'eau et génèrent donc beaucoup d'effluents. Cela doit être pris en compte, même si l'absence de paroi chaude limite l'encrassement, ce qui permet d'espacer et de simplifier les nettoyages réalisés au moyen de détergents alcalins.

Dans un équipement de chauffage par micro-ondes, l'énergie électrique est convertie en micro-ondes, qui sont acheminées par des guides d'ondes dans une cavité de géométrie calibrée où sont placés les produits. Le champ d'ondes met en mouvement les ions et les molécules polaires contenus dans l'aliment. Cette agitation, en particulier celle de l'eau, est transformée en chaleur. Le chauffage dépend de la profondeur de pénétration des micro-ondes, qui est fonction de la fréquence utilisée et de la composition de l'aliment. Le point faible du chauffage par micro-ondes est qu'il n'est pas homogène. Des points chauds se

forment, liés aux nœuds de résonance des ondes, mais aussi à la taille, à la forme, et à la teneur en eau du produit. Les inhomogénéités de température sont en général élevées, ce qui nécessite soit de traiter les produits sur plusieurs faces, soit de les mettre en mouvement sur des plateaux ou des tapis pour homogénéiser le traitement. Le traitement industriel est le plus souvent réalisé en tunnel, les produits étant conditionnés dans leur emballage final (par exemple, plats préparés en barquettes operculées) et circulant en continu sur un tapis à pression atmosphérique, avec des applicateurs micro-ondes localisés au-dessus et au-dessous du tunnel. Le traitement thermique par micro-ondes délivre une puissance importante et ciblée permettant de chauffer rapidement le produit, car l'énergie dissipée ne chauffe directement que le contenu humide dans l'emballage.

Vers des procédés de chauffage plus efficaces et durables

Augmenter la durabilité du chauffage passe d'abord par une amélioration de la conception des équipements et un meilleur contrôle de leur fonctionnement. Il s'agit d'optimiser les conditions de traitement pour assurer la qualité microbiologique du produit, tout en préservant ses qualités sensorielles et nutritionnelles et en minimisant la consommation d'énergie et d'eau. Cette optimisation, dite « multiobjectif », nécessite une modélisation mathématique des phénomènes mis en jeu. Ce paragraphe montre quelles sont, face à ces enjeux, les recherches en cours et les progrès qu'il est possible d'en attendre.

Les premiers modèles de calcul théorique de l'efficacité du chauffage à haute température sur la conservation sont apparus aux États-Unis dans les années 1920. Ils ont permis d'aboutir au concept de valeur stérilisatrice. Si ce concept reste fondamental et utilisé par les industriels, il ne suffit pas à répondre aux défis actuels. Il repose en effet sur de nombreuses hypothèses simplificatrices, tant d'un point de vue thermique (uniformité du traitement thermique dans l'autoclave, forme élémentaire de l'emballage, propagation de la chaleur uniquement par conduction dans le produit, etc.), que microbiologique (réduction décimale régulière des populations bactériennes en fonction du temps). De plus, même s'il a été étendu au-delà des qualités

microbiologiques par la notion de « valeur cuisatrice », il ne permet pas de prendre en compte l'impact du procédé sur toutes les dimensions de la qualité du produit.

Depuis les années 1970, les avancées en modélisation numérique et en informatique ont permis d'appliquer les lois générales de la physique (mécanique des fluides et thermique) aux procédés de stérilisation et de pasteurisation. Il est désormais possible de prédire l'efficacité des procédés en fonction de la variation des conditions dans les équipements, de la géométrie des emballages ou des différences de composition des produits alimentaires. Des modèles numériques simples, prenant en compte l'évolution de la température au cours du temps, peuvent être utilisés pour mieux contrôler les procédés, afin, par exemple, d'optimiser la consommation d'énergie et d'éviter les surcuissons de produits solides traités dans les autoclaves. Des modèles numériques plus complexes ont été développés pour intégrer la nature plus ou moins visqueuse de plats cuisinés en sauce et les écoulements. D'autres travaux tiennent compte des effets du pH et des teneurs en sels sur les vitesses de réduction des populations bactériennes lors de la pasteurisation à basse température, ou de la résistance des spores à la chaleur et leur germination potentielle lors du refroidissement du produit. De nouveaux modèles permettent aussi de prédire l'impact des traitements thermiques sur les qualités sensorielles et nutritionnelles des produits. L'ensemble de ces recherches est essentiel pour garantir la sécurité microbiologique des produits, dans un contexte de formulations allégées ou de barèmes thermiques moins dénaturants répondant à la demande des consommateurs pour des produits frais et *clean label*.

Le nettoyage est un axe clé pour améliorer la durabilité des procédés de pasteurisation-stérilisation. Il s'agit de limiter l'encrassement des échangeurs de chaleur et d'améliorer l'efficacité des opérations de nettoyage, tout en limitant leur nombre et les rejets utilisés. Nettoyer trop longtemps, à des températures trop élevées ou avec trop de produits chimiques peut en effet avoir de fortes répercussions sur l'environnement, tout en augmentant le coût de l'opération. Les recherches menées concernent, entre autres, l'optimisation du décrochement des biofilms bactériens qui s'accumulent sur les parois des conduites en faisant circuler

des fluides chargés de bulles, ou la comparaison des procédés de nettoyage dans des installations de tailles différentes. Des travaux récents associent des approches de modélisation, basées sur les lois classiques de la physique et de la chimie, et des approches utilisées en intelligence artificielle. Ainsi, l'analyse dimensionnelle classique permet de déterminer les grandeurs physiques qui impactent le plus le nettoyage et de transposer les résultats pour des encrassements de natures différentes et dans des installations de tailles différentes. Certaines méthodes d'intelligence artificielle, comme l'apprentissage automatique et la régression symbolique, permettent quant à elles de déterminer sans *a priori* les relations mathématiques à utiliser pour prédire au mieux les phénomènes. L'association de ces deux approches permet de faire face à la diversité des situations rencontrées en pratique. Les méthodes d'intelligence artificielle nécessitant énormément de données, elles doivent néanmoins être associées au développement de nouveaux capteurs.

Les procédés de transformation-conservation industriels sont très consommateurs d'eau. La méthode d'analyse du pincement (en anglais : *pinch analysis*), utilisée en énergétique, peut être adaptée à l'utilisation de l'eau. L'analyse classique du pincement s'applique aux installations dans lesquelles circulent des fluides soumis à des échanges thermiques. Elle permet d'optimiser l'efficacité énergétique de l'installation en lui incorporant des éléments de récupération de chaleur (échangeurs et/ou pompes à chaleur). La méthode d'intégration dite « Pinch Eau » fait se rencontrer « la demande en eau » et « la disponibilité de l'eau » sur un site industriel, pour chaque opération unitaire, qu'elle soit effectuée en lot ou en continu. Elle vise à réduire la consommation d'eau d'une ligne, d'un atelier, voire de l'ensemble d'un site industriel en identifiant les opérations unitaires utilisatrices et productrices d'eau (lavage, convoyage, refroidissement, etc.). Elle permet d'identifier la quantité d'eau minimale théorique nécessaire au bon fonctionnement des procédés étudiés, la structure optimale du réseau d'eau et la manière dont le volume des effluents rejetés pourra être réduit. Cette méthode est applicable à une grande variété de situations, mais n'est pas pertinente lorsque le nombre d'opérations est trop réduit pour que de l'eau puisse « s'échanger »

L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) : UNE MÉTHODE D'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DE RÉFÉRENCE

L'ACV est une méthode standardisée pour quantifier l'ensemble des impacts environnementaux d'un produit ou d'un système de production tout au long de son cycle de vie. Pour cela, il faut d'abord définir le système à étudier et les objectifs de l'étude. Il faut ensuite faire l'inventaire de tous les flux entrants et sortants, ramenés à l'unité fonctionnelle du système, c'est-à-dire la fonction pour laquelle le système est utilisé. L'unité fonctionnelle peut par exemple être 1 kilogramme de pommes, 1 litre de lait, 1 portion de pizza, 100 grammes de protéines ou encore 100 kilocalories. Il devient alors possible de prédire les impacts environnementaux générés par le système à l'aide de modèles élaborés par la communauté scientifique, appelés méthodes de caractérisation. Il s'agit par exemple de la méthode « Environmental Footprint » (EF), recommandée à l'échelle européenne, ou de la méthode internationale ReCiPe. Différentes catégories d'impacts sont quantifiées simultanément, comme le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone, l'acidification des sols, l'eutrophisation des eaux ou l'épuisement des ressources.

L'ACV est largement utilisée dans le secteur agroalimentaire, avec une augmentation constante du nombre de produits et de procédés alimentaires analysés. Elle répond principalement à deux objectifs : identifier les étapes de la production du produit qui sont les sources majeures d'impacts environnementaux et comparer les produits, ou les scénarios de production, entre eux.

Cette méthode continue à faire l'objet de travaux scientifiques, car ses aspects méthodologiques restent à consolider. Par exemple, la notion d'« unité fonctionnelle », fortement structurante de l'analyse, n'est pas simple à appréhender dans le cas de l'évaluation d'un aliment (fonctions de l'aliment ?). De même, analyser des systèmes dits « multifonctionnels », qui vont répondre à plusieurs fonctions, produire plusieurs produits, comme c'est très souvent le cas dans les systèmes alimentaires, n'a rien de trivial. Un autre exemple réside dans la disponibilité et la qualité des données à disposition, qui vont conditionner la qualité finale de l'analyse. Un dernier exemple, et non des moindres, se situe au niveau des méthodes de caractérisation des impacts, tant pour améliorer leur justesse et leur précision que pour s'assurer de couvrir l'ensemble des impacts environnementaux possibles, par exemple, les impacts multiples des pesticides.



entre elles. Sa robustesse dépend de la fiabilité, de la précision et de la représentativité des données acquises sur les lignes de production. Son application par les industriels de l'agroalimentaire nécessitera, outre l'évolution de la réglementation, la mise en œuvre des démarches suivantes : une connaissance fine des effluents générés ; l'analyse des dangers, qui permettra de démontrer que les risques sanitaires sont maîtrisés dans les projets de recyclage et de réutilisation de l'eau ; le développement des procédés de traitement de l'eau avant sa réutilisation.

Pour concevoir des procédés plus durables, il faut être plus efficace et faire des économies d'énergie et d'eau, mais aussi être capable de déterminer l'impact de ces procédés sur l'environnement. La performance environnementale des produits et des procédés est communément réalisée par une méthode scientifique normée de référence : l'analyse du cycle de vie (ACV, voir encadré *supra*).

L'ACV, telle qu'elle est généralement réalisée, est statique, ce qui signifie qu'elle produit des résultats moyennés au cours du temps, qui ne rendent pas compte de la dynamique des procédés. Or, la transformation alimentaire fait intervenir de nombreuses opérations unitaires, donnant lieu à des phénomènes de régulation et de stabilisation des régimes de fonctionnement des équipements, dont les effets temporels sont masqués dans les résultats moyennés. Des développements récents d'ACV dynamique permettent de mieux rendre compte des paramètres clés des procédés de transformation qui sont à l'origine d'impacts environnementaux, ce qui est prometteur pour une meilleure compréhension de leur performance environnementale. L'ACV dynamique est ici entendue comme une prise en compte de la temporalisation du fonctionnement du procédé (par ex., évolution de la consommation électrique au cours du temps), et non comme une temporalisation des méthodes de caractérisation des impacts associés (par ex., évolution du changement climatique à 20, 50 ou 100 ans). Cette approche d'ACV dynamique a récemment été mise en œuvre dans le cas du procédé de production de purée de tomate, qui comprend des opérations de lavage, tri, découpe, cuisson, raffinage, concentration, conditionnement, pasteurisation, refroidissement, en incluant le nettoyage des équipements utilisés. L'étude ne prenait pas en compte les impacts

liés à la culture des tomates ni à l'utilisation du produit après sa sortie de l'usine. Les quantités d'énergie et de matière entrant et sortant d'un système recouvrent les consommations d'électricité et/ou de gaz naturel, les natures et les masses d'ingrédients, les quantités d'eau mise en jeu et les natures et masses de détergents utilisés lors du nettoyage. Ces données peuvent être ponctuelles dans le temps, dans le cas de procédés discontinus, ou présentées sous forme de débits dans le cas de procédés continus. Les résultats obtenus se présentent sous forme de variations de flux de consommation ou d'émission pour chaque étape du procédé. Il est ensuite possible de caractériser les impacts potentiellement générés par le système à l'aide de méthodes de caractérisation classiquement utilisées en ACV. La figure 4 illustre les résultats d'ACV obtenus pour l'indicateur changement climatique d'un procédé discontinu de production de purée de tomate.

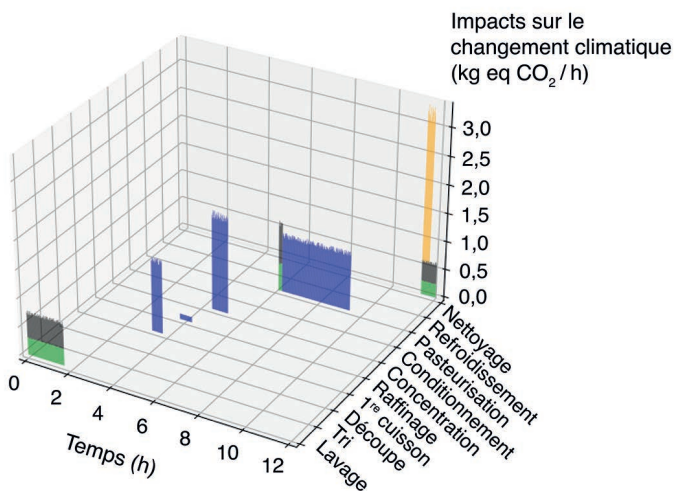


Figure 4. Impacts dynamiques du changement climatique calculés par la méthode « Environmental Footprint version 3.0 (EF3.0) » dans le cas d'un procédé discontinu de production de purée de tomate.

Les impacts liés à la consommation électrique sont représentés en bleu, ceux liés aux détergents en orange, à la consommation d'eau en vert et au traitement des eaux usées en gris. Source : figure de Caroline Pénicaud et Nathalie Ly.

Représenter l'évolution des indicateurs ACV en fonction du temps et pour chacune des étapes permet de comprendre les impacts de l'enchaînement et de la durée des différentes étapes du procédé. Par la différenciation des couleurs, il est facile d'observer les contributions respectives, à chacune des étapes, liées aux consommations électriques, en eau, en détergents ou au traitement des eaux usées (figure 4). Cette représentation permet également de visualiser si la contribution est surtout due à l'intensité des flux mis en jeu (cas des détergents) ou à la durée de l'étape (cas de la pasteurisation). Les aires d'impacts associées à chacune des étapes permettent d'identifier celles qui ont le plus d'effet. Ce type de visualisation permet ainsi de construire des scénarios moins impactants et d'en discuter les modalités avec les différents acteurs. Un autre avantage de la méthode d'ACV dynamique est qu'elle pourrait être appliquée sur des données issues de capteurs mesurant en temps réel les flux de consommation du procédé. Cela permettrait d'optimiser la conduite des étapes les plus impactantes à partir des variables mesurées en fonctionnement, et non de manière anticipée ou *a posteriori*, comme c'est actuellement le cas. Cette méthode d'ACV dynamique pourrait aussi directement s'intégrer dans une boucle d'optimisation multi objectif, qui prendrait en compte, outre la dimension environnementale, plusieurs dimensions de la qualité du produit, comme sa valeur nutritionnelle ou son coût. Elle pourrait enfin permettre de planifier et d'optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie en fonction du temps, en se basant sur des données d'impact et les prix de l'énergie en temps réel, et non sur des valeurs ou des mesures plus anciennes.

PEUT-ON ALLER VERS UN FROID PLUS DURABLE ?

Comment produire du froid ?

Il existe différents systèmes de production de froid industriel. Les systèmes de réfrigération les plus utilisés (90 % environ) sont des systèmes à compression de vapeur de fluides frigorigènes, suivis par les systèmes à absorption et, de manière plus confidentielle, par un ensemble de techniques de type froid magnétique, acoustique ou encore élastocalorique. Ces dernières technologies

sont en cours de développement et présentent l'avantage de ne pas utiliser de fluides frigorigènes.

LES MACHINES À COMPRESSION DE VAPEUR

Les systèmes à compression de vapeur reposent sur le principe thermodynamique du cycle de Carnot. Ils s'appuient sur la compression et la détente d'un fluide frigorigène qui circule dans un circuit fermé. Son architecture repose sur quatre éléments fondamentaux, qui correspondent à quatre étapes de changement de phase et d'échange d'énergie :

- L'évaporateur permet la vaporisation du fluide frigorigène en absorbant l'énergie thermique de la source chaude à refroidir. C'est donc à cette étape que se produit le froid.
- Le compresseur comprime le fluide frigorigène, ce qui augmente sa pression et sa température.
- Le condenseur permet une transition du fluide de l'état gazeux sous haute pression vers son état liquide en libérant de la chaleur vers une source froide, généralement l'environnement extérieur.
- Le détendeur permet au fluide frigorigène de passer de l'état liquide à l'état vapeur par une expansion sans échange de chaleur (adiabatique), induisant une baisse significative de la pression et de la température. À sa sortie du détendeur, le fluide retourne dans l'évaporateur pour entamer un nouveau cycle de réfrigération.

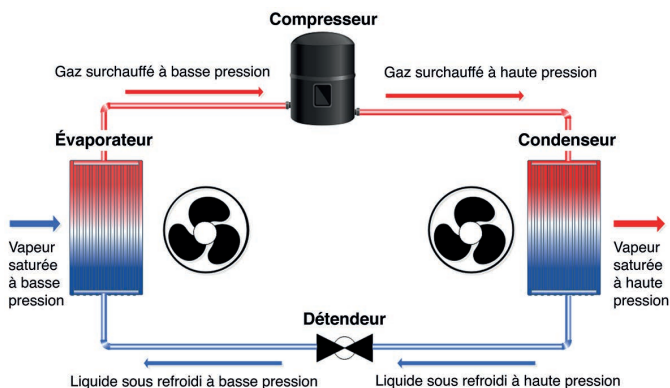


Figure 5. Circuit de réfrigération à compression de vapeur.

Ces systèmes de refroidissement présentent généralement une certaine simplicité d'installation. Source : figure de Laurence Fournaison et Walid Samah.



Les autres systèmes utilisés à l'échelle industrielle sont les systèmes à absorption. L'absorption est un procédé chimique fondé sur la capacité de certains liquides à absorber et désorber des composés sous forme de vapeur. Ces systèmes reposent sur trois des constituants principaux de la machine à compression de vapeur : le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. Le compresseur mécanique est remplacé par un compresseur thermique, formé d'un bouilleur, d'un dispositif de pompage et d'un absorbeur, le bouilleur nécessitant une source chaude. Ces systèmes fonctionnent de manière cyclique. Dans la première étape, le premier adsorbant (réfrigérant) s'évapore à basse pression pour produire le froid dans l'évaporateur. Le réfrigérant (ici, du gaz) est ensuite absorbé dans une solution absorbante (l'absorbeur), ce qui permet de maintenir une pression basse dans l'évaporateur. Au fur et à mesure de l'absorption du réfrigérant, la solution absorbante devient plus diluée et finit par être saturée. Elle est donc régénérée dans le concentrateur, où elle est réchauffée à environ 85 °C, permettant l'évaporation d'une partie du réfrigérant. La solution régénérée retourne à l'absorbeur, tandis que le réfrigérant extrait du concentrateur est dirigé vers le condenseur, où il est refroidi avant de retourner à l'évaporateur.

Ces machines frigorifiques sont robustes car elles ont peu de pièces mécaniques, ce qui limite les pannes. En revanche, leurs rendements sont très inférieurs à ceux des systèmes à cycles de compression de vapeur. Elles connaissent néanmoins un nouvel essor, car elles peuvent être déployées lorsqu'une source de chaleur dérivée d'un autre procédé existe sur un site industriel et est non exploitée. Quand la source chaude est issue du rayonnement solaire, cette technique est souvent appelée « froid solaire ».

D'autres techniques permettant de produire du froid ne sont pas utilisées à l'échelle industrielle, car elles ne sont disponibles que pour de faibles puissances ou sont encore en cours de développement.

L'effet Peltier est un effet thermoélectrique qui transforme un courant électrique en une différence de température. Un matériau constitué de semi-conducteurs peut produire du froid sur l'une

de ses faces et de la chaleur sur l'autre. Le refroidissement par effet Peltier est efficace et économique pour des applications de faible puissance de refroidissement (environ 300 Watt maximum par élément) et fonctionnant à une température proche de la température ambiante (jusqu'à environ 20 °C d'écart).

La réfrigération magnétique utilise l'effet magnétocalorique, c'est-à-dire le fait que la température de certains matériaux augmente ou baisse lorsqu'on les soumet à une variation temporelle du champ magnétique. Sa principale limitation est que le changement de température obtenu est relativement faible (environ 5 °C) dans la plage de variation raisonnable du champ magnétique (1-2 Tesla). Néanmoins, cette technique permet aujourd'hui de faire fonctionner un réfrigérateur domestique.

D'autres systèmes de refroidissement sont en cours de développement dans les laboratoires, tels que l'évaporation, l'acoustique, l'électro-calorique, l'élasto-calorique et le froid passif par rayonnement. Ces systèmes permettent à ce jour des refroidissements maximums de 10 °C.

Cet inventaire montre la difficulté actuelle à produire du froid à faible émission de CO₂ pour des puissances élevées. Certes, les machines à compression de vapeur restent les plus efficaces, mais la problématique liée aux fluides frigorigènes est majeure, car la réglementation pourrait amener à se trouver sans solution pérenne et efficace pour certaines applications, comme précisé ci-dessous.

Besoin en froid et enjeux climatiques

Le froid est indispensable dans nos sociétés, en particulier pour l'agroalimentaire. Environ 20 % de la consommation électrique est aujourd'hui dédiée au froid alimentaire, et cette part devrait continuer à croître en raison du réchauffement climatique et de la multiplication du nombre d'équipements ménagers. La production de froid contribue elle-même au réchauffement climatique, tant par la consommation des équipements que par la nature des fluides frigorigènes utilisés. L'Institut international du froid rapporte ainsi que la contribution actuelle du froid au réchauffement climatique est de l'ordre de 8 %.

Les premiers fluides frigorigènes utilisés étaient les chlorofluorocarbones (CFC) et les hydrochlorofluorocarbones (HCFC), dont la contribution à la destruction de la couche d'ozone a été établie. Ces fluides ont été progressivement bannis avec la ratification du protocole de Montréal en 1995. De nouveaux fluides tels que les hydrofluorocarbones (HFC), sans danger pour la couche d'ozone, ont été développés, mais ce sont des gaz à effet de serre. Une série de réglementations a été mise en place concernant ces fluides (protocole de Kyoto, 1997 ; amendement de Kigali, 2016) afin de diminuer drastiquement leur utilisation en suivant des calendriers précis. Au niveau européen, la réglementation F-Gaz impose de ne plus utiliser, d'ici 2030, des fluides dont le pouvoir de réchauffement global (PRG) dépasse 150, avec pour objectif leur élimination totale d'ici 2050. Les recherches s'orientent aujourd'hui vers le développement de nouveaux fluides de synthèse, par exemple les hydrofluoro-oléfines (HFO), qui présentent de très faibles PRG, mais dont la décomposition produit des per- et polyfluoroalkylées (PFAS), ou vers l'utilisation de fluides dits « naturels », comme l'ammoniac (NH_3), les hydrocarbures ou le CO_2 . L'utilisation du CO_2 comme fluide frigorigène connaît une croissance importante. Cependant, son efficacité se dégrade significativement avec la hausse des températures extérieures (réchauffement climatique). Les hydrocarbures ou l'ammoniac présentent quant à eux des restrictions d'utilisation en raison des risques industriels qu'ils peuvent induire (inflammabilité par exemple).

Les recherches actuelles visent non seulement à remplacer les fluides frigorigènes, mais aussi à réduire leur quantité et à améliorer la performance des systèmes frigorifiques. Ces perspectives de transition vers un froid durable constituent un véritable défi pour les chercheurs comme pour les industriels.

Vers un froid à faible émission de CO_2 ?

La réfrigération secondaire et le stockage de froid sont deux pistes pour aller vers un froid plus durable, le stockage d'énergie augmentant la flexibilité des systèmes de gestion énergétique. D'autres dispositifs sont à l'étude pour récupérer de l'énergie, améliorer l'efficacité des échanges thermiques ou produire le froid de manière localisée.

La réfrigération secondaire consiste à confiner l'unité frigorifique dans une salle des machines et à distribuer le froid jusqu'aux lieux d'utilisation par le biais d'un fluide neutre pour l'environnement tel que l'eau glacée. Ce procédé permet de réduire la quantité de fluide frigorigène des installations par un facteur pouvant aller jusqu'à 10, et d'utiliser plus facilement des fluides dits « à risques » (inflammables, explosifs). Largement déployée, cette technique peut néanmoins dégrader l'efficacité de la machine, car elle nécessite l'utilisation d'un échangeur de chaleur supplémentaire (entre l'évaporateur et le fluide frigoporteur) et d'une pompe de circulation du fluide, lesquels sont consommateurs d'énergie. Une bonne gestion de l'énergie permet néanmoins de limiter cette surconsommation.

Un autre moyen d'augmenter l'efficacité des systèmes frigorifiques est d'utiliser des fluides frigoporteurs diphasiques à haute densité énergétique, tels que les coulis de glace. Ces derniers sont constitués de petits cristaux de glace mis en suspension dans une solution aqueuse par le biais d'un générateur de coulis. La fusion des cristaux de glace permet de restituer une quantité d'énergie élevée, bien supérieure à celle d'un fluide monophasique (jusqu'à 80 fois lorsque les cristaux représentent environ un tiers du mélange). Ces fluides permettent de diminuer la taille des canalisations, ils possèdent généralement de bonnes propriétés de transfert de chaleur et leur forte densité énergétique autorise la diminution des puissances de pompage nécessaires. Encore confidentielle en France, cette technologie se révèle très pertinente lorsqu'elle est couplée à un système de stockage de froid.

Le stockage thermique, une des technologies émergentes applicables à la réfrigération, consiste à stocker de l'énergie lorsque son coût est bas ou si les besoins en froid sont faibles, afin de l'utiliser au moment souhaité. Il s'opère soit par chaleur sensible, soit par chaleur latente. Dans le premier cas, il s'agira de refroidir un grand volume d'eau (ou d'un autre fluide) à basse température. Dans le second cas, il s'agira de congeler un grand volume d'eau ou d'autres matériaux qui changent d'état à des températures négatives. À titre de comparaison, pour la même variation de température, un mètre cube de glace stocke environ dix fois plus d'énergie qu'un mètre cube d'eau. En pratique, le

stockage du froid est réalisé soit dans de grands réservoirs d'eau traversés par un échangeur de chaleur, soit dans des nodules ou des tubes où l'eau est encapsulée et subit des cycles de congélation/décongélation grâce à un fluide qui circule autour de ces nodules ou de ces tubes.

Le stockage nocturne de froid est une autre solution pertinente, car les conditions opératoires de la machine frigorifique (basses températures extérieures) permettent des rendements énergétiques supérieurs à ceux obtenus en journée, surtout en période caniculaire. De plus, l'électricité est, au moins pour le moment, meilleur marché durant la nuit. Le stockage de froid permet par ailleurs de réduire la puissance frigorifique de la machine installée en profitant de la puissance stockée pour faire face aux fortes demandes aux heures les plus chaudes de la journée.

Le stockage thermique augmente l'inertie thermique et la flexibilité du système. Il facilite en outre le déploiement des stratégies de gestion énergétique (effacement des réseaux électriques) et l'intégration des énergies renouvelables (solaire, éolien, etc.). Depuis quelques années, des dispositifs législatifs soutiennent ces développements. C'est le cas, au niveau français, de la loi sur la Nouvelle organisation du marché de l'électricité (loi NOME, 2010) et, au niveau européen, du paquet horizon 2020, qui vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20 %, à porter à 20 % la part des énergies renouvelables et à améliorer l'efficacité énergétique de 20 %. L'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques présente un intérêt particulier pour les professionnels de l'industrie agroalimentaire, car la part de leur consommation énergétique dédiée à la production du froid peut atteindre 70 %.

Un autre moyen d'améliorer l'efficacité énergétique d'un procédé de refroidissement est de l'intégrer dans une démarche globale de réduction de la consommation énergétique, par exemple d'un supermarché ou d'une cuisine centrale. En effet, pour produire du froid, une machine frigorifique dégage de la chaleur qui est souvent perdue. L'installation de récupérateurs de chaleur sur le condenseur permet, par exemple, de préchauffer de l'eau chaude sanitaire. Cette pratique engendre donc une diminution de la

consommation globale d'énergie d'un système. Cela peut être accompagné de l'utilisation de technologies visant à réduire les consommations énergétiques, telles que l'utilisation de récupérateurs d'énergie cinétique lors de la détente du fluide frigorigène, la brumisation des condenseurs ou encore les dispositifs de froid localisé.

La brumisation des condenseurs consiste à envoyer un spray d'eau autour des condenseurs. Cela permet à la fois d'abaisser la température de l'air autour de l'échangeur et d'augmenter les échanges du fait de l'évaporation des gouttelettes à sa surface. L'utilisation de la brumisation sur un condenseur permet d'économiser jusqu'à 20 % d'énergie et peut être très utile lors de périodes caniculaires. Par ailleurs, une nouvelle technologie de refroidissement exploitant l'effet thermique de l'évaporation d'eau en mimant les propriétés d'évapo-transpiration de la végétation a récemment été proposée. Un réseau de fibres végétales pompe l'eau liquide, puis la diffuse au sein du condenseur, augmentant l'effet refroidissant de la circulation d'air à ce niveau. Le froid localisé permet quant à lui de circonscrire l'utilisation du froid là où il est nécessaire, par exemple sur les tables de découpe ou de traitement du produit, plutôt que de refroidir des pièces entières. Cette technologie peut permettre de diviser par quatre la consommation en énergie, tout en réduisant les troubles musculo-squelettiques des opérateurs.

Comment mieux conserver les aliments par le froid ?

Il existe un grand nombre de systèmes de réfrigération et de congélation des aliments, basés sur la circulation de l'air, l'air humide, le contact direct, l'immersion, la glace, la cryogénie, le vide ou le changement de pression. Les systèmes à air sont les plus utilisés, principalement en raison de leur flexibilité et de leur facilité d'utilisation. Cependant, d'autres systèmes tels que l'immersion et la cryogénie peuvent offrir une réfrigération ou une congélation beaucoup plus rapide et mieux contrôlée.

Le refroidissement par l'air est de loin la méthode la plus utilisée pour refroidir et congeler les aliments, car elle est hygiénique et relativement non corrosive pour l'équipement. Refroidi au niveau d'un évaporateur, l'air est soufflé dans une pièce où se

trouvent les produits à refroidir, ou dans des équipements tels que des tunnels avec convoyage développés spécifiquement. La taille de ces équipements peut varier de 2 m³ pour des cellules de refroidissement à des systèmes capables de refroidir plusieurs milliers de carcasses de volailles.

Lorsque les produits à congeler sont de petite taille, le refroidissement par air dans un tunnel est peu adapté, car les produits ont tendance à former du givre en surface et à s'agglomérer. Un moyen de s'affranchir de cette difficulté est l'utilisation de lits fluidisés. Le principe de la fluidisation repose sur la mise en mouvement de particules relativement uniformes par un courant d'air ascendant. À une certaine vitesse, les particules flottent dans le courant d'air. Les produits sont ainsi introduits dans l'extrémité supérieure d'un tunnel incliné, où ils sont simultanément transportés et congelés par le même air. Les congélateurs à lit fluidisé peuvent également être combinés à un système de transport. Ils sont utilisés pour des produits à écoulement libre, notamment des légumes (petits pois, carottes en rondelles, haricots verts, etc.) et des fruits, mais ils peuvent également être utilisés pour les crevettes cuites décortiquées, les viandes en dés, etc. Le refroidissement par air est facile à mettre en œuvre, mais il est peu efficace. De plus, il déshydrate partiellement les produits non emballés et se révèle souvent hétérogène.

Le refroidissement par un liquide (avec des systèmes par immersion) est beaucoup plus efficace qu'avec un gaz. Les systèmes d'immersion ou de pulvérisation consistent à plonger les produits dans un liquide froid ou à pulvériser un liquide froid sur l'aliment. La taille de ces systèmes va des réservoirs de 2 à 3 m³, utilisés pour refroidir de petits lots de produits cuits, aux grands systèmes de refroidissement en continu capables de refroidir 10 000 carcasses de volaille par heure. Cela permet d'obtenir des transferts de chaleur très importants. Les méthodes d'immersion et de pulvérisation offrent en outre plusieurs avantages en termes de réduction de la déshydratation et des problèmes de givre. Cependant, ces procédés peuvent être source de contaminations croisées et doivent donc être utilisés avec les plus grandes précautions, en suivant la réglementation en vigueur.

Les types de refroidissement par air ou par liquide de refroidissement présentent chacun des avantages et des inconvénients. Ainsi, selon la nature du produit, sa taille et les exigences de cinétiques de refroidissement, telle ou telle technologie sera privilégiée. D'autres procédés qui ne mettent pas en œuvre de fluide de refroidissement sont disponibles : le refroidissement sous vide, le refroidissement et la conservation par contact direct, ou encore le refroidissement par échangeurs à surface raclée lorsque le produit est liquide ou semi-liquide.

Les produits alimentaires ayant une grande surface par rapport au volume, tels que les légumes à feuilles, et une capacité à libérer facilement l'eau interne, peuvent se prêter au refroidissement sous vide. Les produits sont placés dans une chambre à vide, l'évaporation d'eau refroidissant rapidement leur surface. Traditionnellement, cette méthode est utilisée pour éliminer la « chaleur du champ » des légumes feuilles immédiatement après leur récolte, mais elle convient également à de nombreux autres aliments (produits de boulangerie, sauces, soupes, aliments en morceaux et viandes).

Les méthodes de réfrigération (ou de conservation) par contact sont basées sur le transfert de chaleur par contact entre les produits et les surfaces métalliques refroidies. Les avantages de cette méthode sont notamment un transfert de chaleur plus efficace et des économies d'énergie significatives par rapport à la réfrigération à l'air. Une de ses déclinaisons est le refroidissement à l'aide de glace pilée ou d'un mélange glace/eau, simple, efficace et couramment utilisé pour refroidir le poisson et certains fruits et légumes. Le refroidissement est dû à la fois au contact entre le produit et la glace et à l'énergie frigorifique dégagée par la fusion de la glace.

Les échangeurs à surface raclée sont conçus pour refroidir ou congeler partiellement des produits liquides ou semi-liquides. Leur principe consiste à faire circuler un fluide dans un cylindre refroidi sur toute sa surface externe par un fluide frigorigène. Des lames racleuses, mises en rotation dans le cylindre, assurent un bon mélange thermique et une amélioration des transferts en paroi, alors que, dans le cas de la congélation, les lames raclent la

fine couche de glace qui se dépose sur la surface et l'entraînent dans le fluide. Cette technologie permet un transfert de chaleur et une vitesse de congélation élevés. Les avancées technologiques permettent d'améliorer l'homogénéité et l'efficacité de la réfrigération de ces dispositifs largement utilisés.

D'autres pistes sont en développement dans les laboratoires, dont la technologie du *superchilling*. Il s'agit d'un procédé hybride entre la réfrigération et la congélation, qui consiste à congeler partiellement un produit (30 % de teneur en glace environ) et à le maintenir à une température juste en dessous du point de congélation (entre -1 et 0°C pour la plupart des produits alimentaires riches en eau). Le *superchilling* stoppe la croissance bactérienne, ce qui améliore la sécurité sanitaire du produit et limite son altération microbienne. Cela permet de prolonger la durée de vie de la plupart des produits frais (jusqu'à 3 semaines environ pour certains produits) lorsque les phénomènes biochimiques, comme l'oxydation, ne sont pas limitants. Il nécessite un contrôle fin de la température de conservation pour éviter des variations de jutosité ou de texture, liées à la décongélation de l'eau qui était initialement sous forme cristallisée. Ce procédé consomme un peu plus d'énergie qu'une conservation de type produits frais, qui a lieu entre 2 et 6°C , mais moins que la congélation à -18°C . Néanmoins, il nécessite le développement d'une chaîne du froid adaptée à ces nouvelles conditions de conservation des aliments, y compris chez le consommateur.

Améliorer la chaîne du froid et ses maillons

Les produits alimentaires frais qui arrivent dans l'assiette du consommateur ont souvent suivi un long périple. En effet, après la récolte pour un végétal, l'abattage pour un animal ou la pêche pour les produits de la mer, les produits sont découpés puis réfrigérés selon la réglementation en vigueur. Ils sont ensuite entreposés, transportés, puis distribués, avant d'atteindre le réfrigérateur du consommateur. Ces étapes constituent différents maillons de la chaîne du froid. Certaines chaînes du froid peuvent comprendre plusieurs étapes de transport durant lesquelles le produit doit être conservé à la température réglementaire exigée. Si la majorité des produits sont conservés dans d'excellentes

conditions de température, quelques cas de dépassement de température ont été observés dans les maillons aval de la chaîne du froid, principalement au niveau des meubles de vente et des réfrigérateurs domestiques.

Actuellement, le pilotage de la chaîne du froid repose principalement sur le respect des températures, fixées par la réglementation et les spécifications entre producteurs et distributeurs. Ces consignes, souvent appliquées aux ambiances de stockage et de travail, ne reflètent pas toujours la température réelle des produits et pourraient être optimisées. Ainsi, un pilotage multicritère de la chaîne du froid peut être proposé. Ce pilotage repose sur l'impact des températures de consigne des procédés de refroidissement ou des chambres froides dans les ateliers de transformation, tant sur la température des produits que sur les consommations énergétiques, le risque sanitaire et l'altération microbiologique des produits, depuis la production jusqu'à la date limite de consommation (DLC). À titre d'exemple, des modèles intégrés ont été développés, combinant l'évaluation quantitative des risques liés à *Listeria monocytogenes* dans le jambon cuit, les pertes et le gaspillage alimentaire liés aux bactéries lactiques, ainsi que la consommation énergétique des procédés frigorifiques (Duret, 2014). L'ajout de fonctions de détermination des coûts permet d'aboutir à des systèmes d'aide à la décision multicritères qui facilitent l'identification des scénarios de chaîne du froid les plus adaptés.

D'un point de vue pratique, les résultats montrent l'importance pour le consommateur de veiller à maintenir une température de 4 °C dans son réfrigérateur, car le bénéfice lié à la diminution du risque sanitaire et du gaspillage dépasse largement le surplus de consommation énergétique par rapport à la température moyenne actuelle qui est de 6 °C.

Récemment, un modèle multicritère a également été développé pour intégrer l'évolution des températures des produits le long de la chaîne du froid, la consommation électrique des groupes frigorifiques, la consommation de carburant du transport, la détérioration de la qualité des produits et les coûts logistiques (Duret *et al.*, 2021). Ce modèle permet de prendre en compte le comportement des opérateurs (mise en stockage/rayon, rejet des

produits) et la perception des consommateurs (achat/consommation). En effet, la probabilité d'achat et de consommation des produits est liée à leur qualité, elle-même dépendante de l'histoire thermique en amont de la chaîne et du comportement du consommateur (perception, goût, habitude...). Ce comportement joue un rôle majeur dans le gaspillage des fruits et légumes, dans le magasin et au domicile, mais il est rarement pris en compte dans l'évaluation du gaspillage au sein de la chaîne du froid (voir « Développer de nouvelles combinaisons de procédés et d'emballages en lien avec le comportement du consommateur »), ou de la durabilité des produits alimentaires. Or, la phase de production agricole représentant en moyenne actuellement environ 70 % de l'impact des aliments, tout gaspillage a un impact majeur sur la durabilité ; l'éviter est d'autant plus crucial qu'on se rapproche de l'utilisateur final. L'impact environnemental lié spécifiquement à l'utilisation de matériaux d'emballage et à la consommation d'énergie des équipements frigorifiques a été évalué dans le cadre d'une étude sur la fraise (Matar *et al.*, 2018 ; Matar *et al.*, 2020). La quasi-totalité des impacts de la chaîne post-récolte des fraises est liée à la fabrication et à l'utilisation des emballages et au transport des produits en camions frigorifiques. L'étude a permis d'identifier les principales recommandations pour réduire les impacts environnementaux de la chaîne du froid. Elles concernent essentiellement le remplacement des emballages plastiques par des alternatives et la diminution des distances entre les différents sites de livraison.

Dans les entrepôts et les chambres froides, les produits alimentaires sont conditionnés dans différents emballages et à différentes échelles (emballages primaires, secondaires, etc., voir « Quel rôle pour les emballages ? ») : barquettes, colis/cartons/cagettes, palettes, etc. Ces contenants ont une forte influence sur les écoulements et les transferts massiques ou thermiques qui pilotent les conditions de refroidissement ou de conservation des produits. À chaque échelle (barquette, colis, palette, entrepôt), des hétérogénéités de température sont rencontrées en raison d'une mauvaise circulation de l'air. C'est pourquoi des recherches portent sur l'emballage du produit (forme, positionnement et taille des orifices), son agencement dans le colis (cagette, carton)

et dans l'ensemble de la palette, afin d'optimiser cette circulation d'air à tous les niveaux de la chaîne du froid.

L'augmentation des températures de conservation est une autre piste envisagée pour réduire la consommation énergétique du refroidissement et de la conservation des produits surgelés. En effet, si la température de conservation des produits congelés a été fixée arbitrairement à 0 °F, soit - 18 °C, remonter de trois degrés cette température permettrait une baisse de 10 % de la consommation énergétique. Des études sont actuellement menées pour évaluer le risque sanitaire associé à cette baisse, surtout sur des produits sensibles tels que la crème glacée et les produits à base de viande ou de poisson. Néanmoins, cette démarche ne peut pas être directement transposée aux produits réfrigérés, car une telle remontée de température serait préjudiciable à leur conservation.

La gestion des installations frigorifiques est un secteur clé pour la qualité des produits. C'est pourquoi les grandes installations frigorifiques sont équipées de systèmes de gestion technique centralisée. Munis de nombreux capteurs, ils permettent à l'opérateur d'optimiser le fonctionnement des installations, en surveillant par exemple la température à l'intérieur de l'équipement, mais aussi d'alerter en cas de problème ou même d'anticiper des pannes de la machine. Ces systèmes de gestion permettent à la fois de minimiser les pertes de marchandises et de mieux respecter l'environnement, en réduisant, entre autres, la surconsommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dues aux fuites de réfrigérant.

De nouvelles technologies de prédiction et de détection de panne pour les équipements de faible puissance, qui nécessitent des solutions à la fois compactes (nombre réduit de capteurs) et robustes (capables de détecter plusieurs types de défaillances), sont en cours de développement. Par la suite, ces solutions seront intégrées aux équipements frigorifiques de faible puissance (meubles, armoires, petites chambres froides...), couramment utilisés dans les circuits de proximité, dont le développement est en plein essor.



DÉCONTAMINATION ATHERMIQUE ET TECHNOLOGIES BARRIÈRES : UNE ASSOCIATION PLUS DURABLE ET PLUS SÛRE ?

Bien que certains procédés physiques non thermiques d'inactivation microbienne soient connus depuis plusieurs décennies, ils suscitent aujourd'hui un regain d'intérêt. L'inactivation des micro-organismes peut en effet être obtenue grâce à l'utilisation du rayonnement lumineux (UV, lumière pulsée), des champs électriques et électromagnétiques (**champs électriques pulsés**, « **plasma froid** »), de radiations ionisantes, ou encore par l'application d'ultrasons ou de hautes pressions. Ces technologies sont dites « athermiques », mais certaines s'accompagnent d'un certain échauffement pouvant contribuer à leur efficacité (champs électriques pulsés, ultrasons, hautes pressions). Pour savoir comment ils pourraient être utilisés pour rendre les procédés de conservation plus durables, il faut d'abord comprendre leur potentiel et leurs limites. Ceux-ci dépendent à la fois de leur efficacité sur les micro-organismes (flores microbiennes **végétatives**, spores, parasites, virus), du type d'aliment (animal ou végétal, solide ou liquide, épaisseur et géométrie des produits solides...), de leur possibilité d'application sur des aliments déjà emballés, et des conditions environnementales et sanitaires existant dans les filières (contrôles vétérinaires, chaîne du froid...). Ces technologies peuvent être associées entre elles, ainsi qu'avec une modification de la composition de l'aliment, pour aller vers une conservation plus durable et plus sûre.

PRÉSENTATION DES TECHNOLOGIES ATHERMIQUES

Les technologies sont présentées ici en fonction de leurs principes physiques et de leurs mécanismes d'action sur les micro-organismes.

Les lumières ultraviolettes (UV)

L'utilisation de la lumière ultraviolette (UV) en matière de décontamination est connue empiriquement depuis longtemps, puisqu'elle complète l'effet du séchage solaire pour conserver les aliments et en assurer la sécurité sanitaire. Parmi les UV, ce sont les UV-C, dont la longueur d'onde est comprise entre 100 et 280 nanomètres, qui sont les plus efficaces sur l'ADN des micro-organismes. La lumière peut interagir avec d'autres molécules photosensibles, pour les détruire directement ou, en présence d'O₂, pour déclencher la production d'espèces réactives de l'O₂ (ROS). Ces ROS réagissent avec les protéines et les lipides contenus dans la cellule et peuvent être toxiques pour le consommateur. Des systèmes statiques de désinfection ont été développés grâce à des lampes, notamment au krypton, permettant de soumettre la surface de l'emballage ou de l'aliment à des longueurs d'onde très proches de la valeur d'inactivation maximale des UV-C. La technique peut également être appliquée sur de petits volumes de liquides qui peuvent être traversés par les UV (thé, lait, café, jus végétaux et sirops de sucre peu concentrés), mais l'effet de la lumière dépend aussi de la puissance d'émission, qui augmente son efficacité et permet aux UV de pénétrer un peu plus dans l'aliment. Cette constatation a conduit au développement de technologies de lumières pulsées, basées sur l'émission discontinue, brève et répétée d'UV-C de très forte puissance. Elles ont été rendues possibles grâce à la conception de lampes en quartz, contenant du xénon soumis à des décharges électriques de quelques millièmes de seconde. Sous l'effet de ces décharges, le xénon se transforme en un plasma qui émet de la lumière blanche assez riche en UV sous forme d'un flash, le plasma disparaissant ensuite pour revenir à l'état initial du gaz. Les techniques pulsées émettent dans une gamme plus large d'UV-C, ce qui permet d'inactiver plus



efficacement, non seulement les bactéries, mais également les virus et les moisissures, y compris leurs spores sur des aliments solides (fruits et légumes, viandes, poissons, etc.). UV statiques et lumière pulsée peuvent être très efficaces pour inactiver les emballages et la surface de coupe de nombreux produits, mais sont cantonnés aux surfaces atteignables par le rayonnement. Ces technologies ne sont donc efficaces ni sur les zones cachées, repliées, ni en profondeur des aliments, en particulier ceux qui sont solides et opaques aux UV. Lorsque l'aliment est traité alors qu'il est emballé, l'emballage doit être transparent aux UV.

Les plasmas froids

L'application de décharges électriques intenses dans les gaz peut conduire à leur ionisation et à la formation de plasma froid à pression atmosphérique. Les milieux utilisés sont l'air, le N_2 , l' O_2 ou des mélanges spécifiques de gaz rares. La formation du plasma s'accompagne de la génération de ROS et d'espèces réactives de N_2 (RNS), qui provoquent l'oxydation des **acides aminés** et des lipides. De plus, la remise en suspension de molécules par les photons UV endommage les membranes et les composants cellulaires internes, ainsi que le génome, ce qui entrave la réplication de l'ADN. L'efficacité du traitement varie en fonction de la valeur de la tension électrique et de la fréquence des décharges, du type et de la concentration de gaz, de la durée du traitement et du mode d'exposition. L'exposition directe et rapprochée au plasma est considérée comme plus efficace que l'exposition indirecte et plus éloignée, en raison de la courte demi-vie des espèces réactives. Cependant, les expositions indirectes peuvent être utiles pour garantir un traitement tridimensionnellement uniforme sur toutes les faces des produits alimentaires de grande taille. Lorsque l'aliment est liquide, le plasma doit être plongé dans le milieu pour assurer un contact complet, ce qui n'est pas nécessaire pour les produits solides. Cela rend l'application du traitement en général plus complexe pour la décontamination des liquides que pour celle des solides. Le plasma froid peut en outre être appliqué directement sur le produit alimentaire ou à l'intérieur d'un emballage, ce qui

permet d'éviter les recontaminations ultérieures. Néanmoins, les **fonctionnalités barrières** de l'emballage peuvent dans certains cas s'en trouver altérées.

Les champs électriques pulsés

Les champs électriques pulsés consistent à placer le produit alimentaire entre deux électrodes et à le soumettre à des impulsions électriques à haute tension (20-80 kiloVolts/centimètres) pendant des périodes courtes et répétées (1-100 microsecondes [μ s]). Ces chocs électriques conduisent progressivement à l'élargissement de la taille des pores existants dans la membrane cellulaire et à la formation de nouveaux pores. Ces phénomènes deviennent au bout d'un certain temps irréversibles et provoquent la fuite des composés intracellulaires vers le milieu extérieur, puis la rupture de la cellule. L'efficacité du phénomène augmente en général avec l'intensité du champ électrique et la durée du traitement. Les propriétés physiques et diélectriques des cellules microbiennes cibles jouent également un rôle crucial dans l'efficacité du traitement. Ainsi, les champs électriques pulsés sont parfaitement adaptés au traitement des produits alimentaires liquides ou semi-solides, tandis que leur application sur les poudres est très limitée en raison de leur faible conductivité électrique. De manière générale, le traitement des aliments solides est plus compliqué que celui des aliments liquides, car ils sont riches en substances protectrices et ont une résistivité électrique hétérogène.

Les radiations ionisantes

La désintégration d'isotopes radioactifs produit des rayonnements ionisants qui peuvent servir à inactiver les micro-organismes présents sur les aliments. Ce sont les rayons γ , issus de la désintégration du cobalt-60 ou du césium-137, qui sont le plus souvent utilisés. Ils possèdent en effet une capacité de pénétration accrue à travers les matériaux solides tels que les plastiques, le verre et le papier, et la dose appliquée peut être modulée en fonction de l'effet recherché. Les micro-organismes exposés subissent des dommages directs de l'ADN, ce qui compromet leur capacité de réplication. En outre, les rayonnements ionisants génèrent,

notamment en présence d'O₂, des espèces réactives qui perturbent les voies métaboliques cellulaires, conduisant à l'oxydation et à la destruction de la cellule. L'efficacité des rayonnements ionisants dépend de la dose appliquée, qui est encadrée par la législation, de la composition de l'aliment, ainsi que de la résistance intrinsèque et de l'état physiologique des micro-organismes. L'**irradiation** ionisante peut être pratiquée sur des aliments emballés. Elle est efficace sur les produits à forte teneur en eau, mais peut aussi être appliquée sur des produits secs comme les épices.

Les ultrasons

Les ultrasons sont un type de vibration acoustique qui, en fonction des conditions de génération, sont classés en basses, hautes et très hautes fréquences. Lorsque les ondes ultrasonores se propagent dans un milieu liquide, elles produisent une alternance périodique de pressions positives et négatives. Ce processus induit la formation de microbulles, qui grossissent, oscillent et éclatent, libérant une grande quantité d'énergie. Celle-ci peut augmenter la température locale du milieu jusqu'à 5 000 °C et sa pression jusqu'à 500 bar (c'est-à-dire 500 fois la pression atmosphérique). Ce phénomène, appelé cavitation, est principalement responsable de la remise en suspension et de l'inactivation des micro-organismes (mais pas de leurs spores). Il s'accompagne de la formation d'ondes de choc, de forces de cisaillement, et de la génération de radicaux libres qui peuvent également endommager les cellules. L'efficacité de l'inactivation augmente en général avec l'intensité de la source, la fréquence ultrasonore et le temps d'exposition. Elle dépend aussi de la température d'application, de la géométrie du produit et de celle de la chambre de traitement. L'inactivation est particulièrement efficace pour les produits riches en eau et elle peut affecter positivement ou négativement (oxydation) la qualité du produit.

Les hautes pressions

Le traitement par haute pression hydrostatique (HP ou **pascalisation**) consiste à plonger pendant plusieurs minutes les aliments emballés dans un milieu liquide à des pressions comprises entre 3 000 et 6 000 bar (soit jusqu'à 6 fois la pression qui existe au

fond de la fosse des Mariannes, la plus profonde sur Terre, à plus de 10 km sous la surface). Ces très hautes pressions désorganisent l'ADN et les structures membranaires des micro-organismes. Elles peuvent également, mais de façon souvent partielle et peu prévisible, dénaturer les protéines et les **enzymes**, tandis que les petites molécules (vitamines, arômes) sont préservées. La technologie peut être appliquée sur des aliments liquides ou solides, conditionnés dans des emballages flexibles résistant à la pression. Elle permet de **pasteuriser** les produits, mais pas de les **stériliser**, car la plupart des spores peuvent résister à des pressions supérieures à 10 000 bar.

INTÉRÊTS ET LIMITES DES TECHNOLOGIES ATHERMIQUES

Les technologies athermiques évitent la dénaturation des composants sensibles à la chaleur et ont en général l'avantage d'être faciles à décarboner, car elles reposent sur une énergie électrique. Certaines d'entre elles sont également moins énergivores que les traitements thermiques classiques, même si peu d'études comparatives existent à ce niveau.

Les techniques d'inactivation athermiques sont capables de pasteuriser les produits liquides ou de traiter la surface des produits solides, à condition que les produits soient modérément contaminés et pas trop riches en matière grasse. Des diminutions des populations bactériennes de 2 à 4 log par gramme dans les produits liquides, et de 1 à 2 log par cm² en surface des produits solides, peuvent être obtenues avec des intensités de traitement modérées. En revanche, les technologies lumineuses, les champs électriques pulsés, les plasmas froids et les ultrasons ne sont pas efficaces lorsqu'un aliment solide est de forme complexe, que sa surface est irrégulière et pleine d'anfractuosités, ou dans le cas où les micro-organismes se situent sous la surface ou plus en profondeur dans le produit. L'effet de l'inactivation par des ROS dépend de la structure de la paroi des bactéries : plus celle-ci est protégée (par exemple, chez les bactéries dites à « **Gram positif** »), plus elle est résistante à l'inactivation athermique. La



taille et la forme des micro-organismes sont souvent des facteurs influençant l'efficacité du traitement, tout comme le pH, la composition du milieu (en particulier en eau et en lipides) et sa force ionique. Ainsi, les UV statiques, les champs électriques pulsés, les plasmas froids et les ultrasons ne permettent pas d'inactiver les spores de micro-organismes, tandis que les hautes pressions ne le permettent que dans des conditions extrêmes, atteignables uniquement en laboratoire.

Les hautes pressions sont autorisées et utilisées dans l'Union européenne en pasteurisation, c'est-à-dire avec un stockage à 4 °C et une durée de vie de quelques semaines à trois mois. Mais leur coût, nettement plus élevé que celui des technologies thermiques, les cantonne à des applications spécifiques où elles présentent de forts avantages **organoleptiques** (jus de fruits, guacamole), ou aux produits découpés puis restabilisés par la pascalisation comme les tapas. Hors Union européenne ou pour des applications très spécifiques (aliments pour astronautes), l'irradiation ionisante est utilisée industriellement pour stériliser les produits alimentaires (ainsi que les emballages vides destinés au conditionnement aseptique), mais avec des doses d'application élevées. C'est également une technologie souvent employée en dehors de l'Europe pour traiter les poudres, en particulier les épices. Champs électriques pulsés, plasmas froids et ultrasons ne sont pas utilisés industriellement, et ni les premiers ni les deuxièmes n'ont fait l'objet d'une autorisation sous la législation « Novel Food » pour la conservation des produits.

Le potentiel d'application industrielle des technologies athermiques dépend de la capacité à traiter des aliments emballés sans dégrader les propriétés de l'emballage, lesquelles doivent convenir aux professionnels comme aux consommateurs. Elles tendent à favoriser l'oxydation, notamment des aliments riches en lipides, ce qui entraîne de mauvaises odeurs, diminue les qualités nutritionnelles, voire conduit à la formation de composés toxiques potentiellement dangereux pour la santé humaine. L'oxydation peut également conduire à la décoloration des produits. Les hautes pressions n'inactivent pas ou peu de nombreuses enzymes **endogènes**, ce qui conduit à des déphasages dans les jus de fruits et à des brunissements au cours du stockage. L'irradiation

ionisante à fortes doses peut quant à elle induire la mutagenèse et la sélection de souches pathogènes résistantes, tandis que des doses sublétales peuvent stimuler la sporulation, la croissance et le métabolisme secondaire des champignons. De plus, cette technologie reste limitée en raison de son manque d'acceptabilité auprès des consommateurs européens.

Un autre frein réside dans le coût élevé des investissements à réaliser pour mettre en place et maintenir ces technologies. C'est le cas, par exemple, des hautes pressions ou de l'irradiation par les rayons γ , cette dernière exigeant l'utilisation d'installations blindées et un personnel qualifié pour manipuler les équipements.

L'analyse des différentes technologies athermiques a conduit à l'idée de les combiner pour bénéficier de leurs avantages respectifs. Ces combinaisons s'inscrivent dans l'approche des technologies barrières.

LE CONCEPT DE TECHNOLOGIES BARRIÈRES

Le concept de technologies barrières, ou *hurdle technology*, consiste à appliquer plusieurs obstacles sous forme de procédés, de conditions de formulation ou de conservation de l'aliment, afin de détruire les micro-organismes et/ou d'inhiber leur croissance.

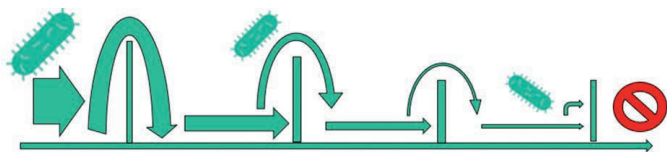


Figure 6. Principe de *hurdle technology* ou technologies barrières.

Une succession (séquentielle ou simultanée) d'obstacles — procédés décontaminants, formulation, conditions de stockage, etc. — qui font échec à la prolifération, voire à la survie de micro-organismes dans l'aliment au cours de sa transformation puis de sa conservation. Aucun de ces obstacles n'est assez intense ni à lui seul suffisant pour stabiliser l'aliment, mais leur combinaison aboutit au résultat désiré. Source : figure de François Zuber.

L'application de ces obstacles peut être séquentielle ou simultanée. L'objectif est d'obtenir au moins autant (effets additifs), et si possible plus (effets synergiques), que la somme des effets produits par chacun des obstacles pris séparément. L'intérêt de ce concept est triple : il peut renforcer la sécurité sanitaire du produit pendant sa conservation, mieux préserver ses qualités sensorielles et nutritionnelles en combinant des traitements plus « doux » qui, utilisés séparément, n'auraient pas permis de sécuriser le produit, et, enfin, conduire à des combinaisons moins énergivores que les traitements utilisés séparément.

La diversité des procédés de conservation rend le nombre de leurs combinaisons possibles très important. De manière générale, la stratégie doit reposer sur la composition et les propriétés physico-chimiques de l'aliment à conserver, ainsi que sur les caractéristiques des micro-organismes ciblés. Ainsi, lorsqu'il est possible d'acidifier l'aliment, diminuer son pH jusqu'à une valeur inférieure à 4,5 empêche les spores des micro-organismes pathogènes de germer. Il suffit alors de détruire ou d'inhiber les formes végétatives des micro-organismes par des conditions de traitement douces, sans se préoccuper des spores, dont la destruction exigerait des conditions de traitement plus drastiques. Une autre approche classique consiste à combiner un premier traitement doux, mais suffisant pour diminuer la charge microbienne et fragiliser les micro-organismes, avec l'application d'un deuxième traitement, ou d'un emballage, qui achève leur destruction et empêche l'implantation de micro-organismes extérieurs.

Il n'existe actuellement aucune règle permettant de prédire quantitativement et de manière fiable l'effet d'une combinaison de procédés, d'une formulation et d'un emballage sur la destruction et la survie d'un micro-organisme ciblé. De nombreuses recherches sont menées, mais souvent au cas par cas, en fonction du type de procédé, de l'aliment et du micro-organisme ciblé. Nous avons choisi de décrire ici quelques exemples combinant plusieurs procédés athermiques et/ou des traitements thermiques d'intensité modérée pour diminuer les consommations d'énergie et l'empreinte carbone.

Les ultrasons peuvent être facilement appliqués aux produits liquides. Lorsque les liquides sont suffisamment transparents, leur association aux UV-C augmente leur efficacité. Outre leur effet inhibiteur propre, les ultrasons peuvent en effet remettre en suspension une partie des micro-organismes attachés sur des surfaces solides ou favoriser la pénétration des substances bactéricides dans les anfractuosités de ces surfaces et à l'intérieur des micro-organismes. Ils peuvent donc être utilisés pour améliorer l'efficacité du prélavage des produits solides, comme les fruits et légumes, et augmenter l'effet bactéricide de composés chimiques biocides, comme l'ozone gazeux, l'acide peracétique, l'acide lactique, ou des substances actives contenues dans des huiles essentielles.

L'efficacité du traitement par les plasmas froids peut être augmentée en enrichissant l'air ionisé en vapeur d'eau ou en ajoutant de l'acide peracétique ou des huiles essentielles dans le gaz à ioniser. Plasma froid et UV-C peuvent avoir un effet synergique, par exemple pour la décontamination d'épices (poivre noir). Les technologies athermiques telles que les ultrasons, les UV-C, le plasma froid ou les champs électriques pulsés peuvent être appliqués avant ou après un traitement par les hautes pressions, ce qui permet d'en diminuer le niveau et les temps d'application. Toutefois, ces combinaisons ne permettent pas forcément de limiter l'oxydation des produits.

L'application des procédés athermiques doit également tenir compte de l'effet lié à l'emballage et des conditions de température appliquées pendant le stockage de l'aliment. L'effet inhibiteur du procédé athermique sur les micro-organismes peut être complété en créant du vide, en maintenant un mélange gazeux défavorable à la croissance des micro-organismes au contact de l'aliment (aliments sous atmosphère de composition modifiée en CO₂, N₂ ou O₂), ou en fixant des composés biocides sur l'emballage. Plusieurs études ont montré les effets additifs, voire synergiques, de certaines de ces combinaisons (par exemple, Abel *et al.*, 2021).

Des effets synergiques importants sont observés entre traitements thermiques et athermiques. Par exemple, dans les jus

de fruits, les micro-organismes pathogènes deviennent plus sensibles aux ultrasons à des températures supérieures à 50-55 °C. L'application des ultrasons sur des produits solides, tels que les saucisses à hot-dog, permet de réduire de 5 log les populations de bactéries lactiques et/ou **psychotrophes**, si la température atteinte est voisine de 70 °C. Les plasmas froids peuvent aussi être plus efficaces en augmentant la température du produit, ce qui permet de réduire la population microbienne de plus de 3 log. Cette réduction peut même atteindre 4 log par l'ajout d'huiles essentielles (comme le citral, le carvacrol ou le limonène) dans le plasma.

Une limite majeure des traitements athermiques réside dans leur difficulté à inactiver les spores microbiennes dans des conditions industrielles. C'est notamment le cas des hautes pressions. Cependant, il a notamment été montré dans une étude que la combinaison de pressions de 5 000 à 7 000 bar et d'une température de 105 °C, appliquée pendant deux minutes, permet de réduire de près de 4 log la quantité de spores de *Geobacillus stearothermophilus*, une bactérie sporulante et hautement thermorésistante, dans des produits alimentaires solides et pâteux (Ahn *et al.*, 2015). Des applications combinant hautes pressions et températures modérées ont ainsi été mises au point avec succès, comme la « pasteurisation basse température assistée par haute pression » pour le foie gras, qui permet de prolonger sensiblement sa DLC à + 4 °C tout en améliorant sa qualité sensorielle.

La plupart des technologies athermiques sont difficiles à utiliser sur des produits solides de forme complexe et de grande taille comme les carcasses d'animaux. L'application de la vapeur peut se révéler intéressante, mais elle est limitée par la cuisson de la surface du produit. Pour minimiser cet effet, le traitement vapeur peut être combiné à l'utilisation de l'acide lactique. Ainsi, combiner un traitement par la vapeur d'une minute à 70 °C à l'application d'une solution d'acide lactique à 10 % pour refroidir le produit génère un effet synergique permettant de diminuer de 6 log la population de *Listeria* en surface de la carcasse, et ce jusqu'à 7 jours après le traitement. Ce type de procédé combiné, appliqué en amont de la chaîne de transformation, pourrait constituer un premier obstacle aux micro-organismes,

associé aux traitements de surface des pièces découpées, au choix d'emballages sous vide ou sous atmosphère modifiée et au stockage réfrigéré du produit, situés en aval.

Un autre exemple de combinaison de technologies barrières est la décontamination préalable d'ingrédients secs granulaires ou **pulvérulents** (épices, légumes déshydratés) au moyen de biocides gazeux tels que l'ozone ou le peroxyde d'hydrogène. La vapeur de peroxyde d'hydrogène peut ainsi être utilisée dans la formulation de produits destinés à être stérilisés thermiquement comme les conserves. La forte décontamination des flores sporulées présentes sur les épices, plus de 3 log sur des spores aussi thermorésistantes que *Moorella thermoacetica*, permet en effet une réduction notable des valeurs stérilisatrices nécessaires pour stabiliser les produits.

L'ensemble de ces exemples illustre le potentiel des combinaisons de traitements athermiques et thermiques, et plus généralement des technologies barrières, pour augmenter la sécurité sanitaire et la durée de conservation des produits frais, tout en favorisant des procédés plus durables. Néanmoins, sauf dans le cas des hautes pressions, ces technologies restent souvent à l'échelle du laboratoire. Cela tient sans doute à la fois au manque d'équipements combinés présents sur le marché et à la difficulté pour les industriels de quantifier les bénéfices qu'ils peuvent attendre de ces procédés émergents par rapport aux coûts d'investissement et de fonctionnement. La demande des consommateurs pour des produits « plus frais » conservés avec des techniques plus durables devrait cependant favoriser leur transfert vers l'industrie. Dans cette perspective, trois enjeux de recherche sont identifiés. Tout d'abord, il est nécessaire de mieux prédire les effets combinés pour optimiser la conception et le fonctionnement des équipements. Dans le même temps, il s'agit d'approfondir les mécanismes d'inhibition et de destruction des micro-organismes dus à ces effets combinés, et de mieux comprendre le développement de résistances de certaines souches. Enfin, il est important de quantifier les impacts environnementaux, en prenant en compte l'ensemble de la chaîne jusqu'à la consommation, y compris le stockage.



QUEL RÔLE POUR LES EMBALLAGES ?

Les emballages sont des partenaires essentiels pour la grande majorité des modes de production et de distribution actuels. Avant de devenir des déchets, ils remplissent des fonctions clés de préservation des aliments, telles que la protection contre l'oxydation, la perte des arômes ou la réhydratation des produits secs, et participent à la stabilisation microbiologique des produits périssables, notamment en maintenant les atmosphères modifiées qui prolongent leur conservation. Ils préservent également l'intégrité du produit grâce à des caractéristiques mécaniques adaptées aux diverses contraintes physiques rencontrées tout au long de l'itinéraire technologique.

Les emballages plastiques, métalliques, en verre ou papiers-cartons ont tous des fonctionnalités d'intérêt qui ont historiquement amené à les utiliser pour des domaines bien définis. Aucune solution technologique aujourd'hui sur le marché ne peut néanmoins être considérée comme neutre du point de vue des interactions contenant-contenu. Ces phénomènes d'interaction sont encadrés par des réglementations nationales et européennes qui assurent un niveau de risque chimique en deçà des seuils acceptables. Le choix d'un emballage est donc une affaire de compromis entre des fonctions attendues, d'une part, et des impacts environnementaux et des interactions chimiques, qu'il convient de minimiser, d'autre part. Les emballages inutiles entraînent en effet des impacts environnementaux qui pourraient être évités.

UNE NOUVELLE RÉGLEMENTATION POUR RÉDUIRE LA POLLUTION PLASTIQUE

La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC, 2020) et le décret 3R (« Réduire, Réutiliser, Recycler »), adopté en 2021, ont fixé des objectifs de réduction de la pollution

plastique. En particulier, la loi trace une trajectoire pour la suppression des emballages plastiques à usage unique à l'horizon 2040. À cette date, l'usage de matériaux plastiques pour la réalisation d'emballages ne sera possible que sur la base d'emballages réemployables. La démarche dite « 3R » vise à réduire la pollution plastique en agissant sur trois leviers : le *recyclage* des emballages plastiques, leur *réduction* et leur *réemploi*.

PLASTIQUE À USAGE UNIQUE, RÉEMPLOI, RECYCLAGE, DE QUOI PARLE-T-ON ?

Les plastiques à usage unique sont des produits fabriqués entièrement ou partiellement à partir de plastique. Ils ne sont pas conçus ou mis sur le marché pour accomplir, pendant leur durée de vie, plusieurs trajets ou rotations, en étant retournés à un producteur pour être remplis à nouveau ou réutilisés pour un usage identique à celui pour lequel ils ont été créés. Cette définition englobe tous les types de plastiques, qu'ils soient issus de l'industrie pétrolière ou de polymères naturels modifiés. Il n'existe pas de seuil minimal pour considérer qu'un emballage est en plastique. Tout emballage composite fabriqué partiellement à partir de plastique est donc concerné, y compris les emballages papiers-cartons.

Le réemploi concerne toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont réutilisés pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.

Le recyclage est l'opération par laquelle la matière première d'un déchet est utilisée pour fabriquer un nouvel objet.

La loi AGEC fixe un cap beaucoup plus rapide pour la généralisation du recyclage des emballages, avec l'objectif de « tendre » vers 100 % d'emballages recyclables dès 2025. Les exigences de recyclabilité concernent tous les emballages, c'est-à-dire que les emballages réemployables devront également être recyclables. La notion de « recyclabilité » inscrite dans la loi ne correspond pas à des caractéristiques techniques d'un objet *théoriquement* recyclable de par sa structure et sa composition, mais à l'existence d'une filière de récupération, tri et valorisation des matières. L'effet recherché à court terme est clairement de conforter les filières en cours de mise en place pour le recyclage des matériaux

de grande diffusion. Les matériaux de spécialité et les plastiques biosourcés, caractérisés par des volumes de production très faibles, trouveront très difficilement une place dans cette feuille de route ; en revanche, le développement du réemploi, qui n'obéira pas aux mêmes schémas de collecte, tri et volume de gisements, pourra offrir une place à ces matériaux dans de nouvelles boucles de recyclage. Établir les conditions qui permettront de créer ces filières basées sur les ressources biosourcées et qui devront, dès leur démarrage, intégrer l'ensemble des étapes industrielles de la chaîne de valeur, en incluant le recyclage, est donc un défi majeur.

Le développement du réemploi des emballages s'inscrit dans une trajectoire plus progressive, qui avait un objectif de 10 % de réduction des plastiques à usage unique entre 2021 et 2025.

De façon plus classique, la loi AGECE fixe des objectifs de réduction pondérale des quantités d'emballages plastiques par la suppression des emballages inutiles, la réduction de la masse unitaire de plastique incorporé dans les emballages en plastique à usage unique, l'utilisation de dispositifs de recharge, et la substitution du plastique par d'autres matériaux dans les emballages en plastique à usage unique. L'élargissement de l'utilisation des emballages papiers-cartons apparaît comme la solution privilégiée pour contribuer à ces objectifs.

Enfin, la réduction de la pollution plastique ne doit pas avoir pour conséquence le transfert vers d'autres impacts environnementaux : la loi précise que les nouvelles solutions d'emballages réemployables ou les nouveaux emballages « non plastiques » devront permettre la réduction des impacts environnementaux par rapport aux technologies historiques d'emballages plastiques à usage unique. Une difficulté réside dans l'évaluation environnementale des différentes solutions. En effet, l'ACV n'intègre pas encore les effets des pollutions par les microplastiques, les connaissances scientifiques n'étant pas encore suffisantes pour modéliser précisément les effets de ces pollutions. Cela peut conduire à des comparaisons sous-estimant les effets sur l'environnement du plastique, en particulier à usage unique, par rapport à d'autres matériaux comme le verre.

LES EMBALLAGES BIOSOURCÉS : UNE SOLUTION PLUS VERTUEUSE ?

La loi AGECE n'a pas fixé d'objectif «4R», le quatrième R, lié à la ressource renouvelable, n'ayant pas été considéré comme une voie de réduction de la pollution plastique. Néanmoins, en exigeant que les solutions de substitution des emballages plastiques à usage unique soient environnementalement moins impactantes que les technologies d'origine, la loi ouvre un cadre favorable pour des emballages théoriquement plus durables que leurs homologues pétrosourcés. Mais les emballages biosourcés sont-ils nécessairement plus durables que ces derniers ?

Les emballages peuvent recourir à deux types de matières premières d'origine biosourcée : les ressources à base de **cellulose**, qui alimentent essentiellement la production des papiers-cartons, et les plastiques biosourcés, utilisés par exemple dans le domaine de la sacherie, pour les mélanges amidon polyester, et les barquettes pour l'acide polylactique.

Les papiers et cartons

Le secteur des papiers et cartons, bien que mature, historique et largement favorisé par les objectifs de réduction des plastiques par substitution matière, doit faire face à de nouveaux enjeux technologiques. Il s'agit en premier lieu de l'efficacité environnementale du recyclage. Le coût environnemental du recyclage des emballages papiers-cartons est en effet très largement perfectible. Cela concerne la consommation et la nature du mix énergétique, les consommations en eau et le coût environnemental de la dépollution des effluents, et, enfin, la valorisation de la fraction plastique. La réduction ou suppression des couches plastiques et l'efficacité fonctionnelle forment un autre enjeu. Les papiers-cartons sont en réalité souvent des plastiques, car ils sont très fréquemment complexés avec des couches plastiques apportant les **fonctionnalités barrières** dont sont dépourvus les matériaux fibreux et donc poreux. Difficilement envisageables comme des emballages réemployables, les papiers-cartons sont destinés, conformément aux objectifs de suppression des emballages plastiques à usage unique à l'horizon 2040, à



progressivement réduire, puis à ne plus recourir à l'usage de couches plastiques. Un des défis est donc le développement de technologies de fonctionnalisation des papiers-cartons, comprenant deux problématiques à appréhender en parallèle : obtenir les performances barrière des hybrides cellulose/plastique actuels sur la base de nouveaux matériaux cellulosiques à moindre teneur en plastique, voire sans recourir aux couches plastiques ; atteindre des performances barrière encore plus élevées, permettant aux papiers-cartons d'être utilisés pour des applications aujourd'hui réservées aux emballages plastiques.

Les fonctionnalisations barrières actuelles reposent sur l'application de couches de polymères synthétiques sur les substrats cellulosiques, ces matériaux étant considérés comme non plastiques. Leur généralisation au détriment des emballages laminés en plastique engendrera de nouveaux défis pour les processus de recyclage, en ce qui concerne la séparabilité et la purification des composants et effluents. C'est pourquoi d'autres technologies de fonctionnalisation des papiers-cartons font l'objet de recherches intensives : traitements **hydrophobants** (par exemple, **chromatogénie**) par greffage de chaînes **alkyles**, dépôts barrières à l'O₂ de micro- ou nanocelluloses, dépôt en couches de barrières inorganiques par **plasma**, etc.

Un défi commun aux technologies de fonctionnalisation des papiers-cartons réside dans la maîtrise des défauts structuraux des substrats ainsi que des couches appliquées sur ces substrats. Plus les exigences de fonctionnalités barrières aux gaz et à la vapeur d'eau sont élevées, plus les enjeux de maîtrise des défauts sont critiques. De plus, les matériaux fibreux sont dimensionnellement très sensibles aux variations de l'humidité ambiante, ce qui aggrave la formation de défauts d'emballages au cours de l'itinéraire technologique.

Les plastiques biosourcés

Faute de filières opérationnelles de recyclage dans les années à venir, le marché des emballages plastiques biosourcés devrait assez rapidement décroître en tant qu'emballages plastiques à usage unique. Deux alternatives seront alors envisageables dans le cadre fixé par la législation française.

La première consiste en leur association aux papiers-cartons (recyclables), soit sous forme de complexes (collage d'un film plastique biosourcé à un support cellulosique), soit sous forme de couches. L'application de ces technologies de fonctionnalisation des papiers-cartons aux plastiques biosourcés ne fait face à aucun verrou majeur. Le défi technique concerne plutôt l'obtention de fonctionnalités barrières élevées, les films polyesters biosourcés les plus courants n'étant pas des matériaux barrières. Ces films apportent néanmoins aux papiers des propriétés de perméabilité sélective. Là où la porosité macroscopique du papier engendre des vitesses de transfert des gaz identiques, les papiers revêtus avec ces films permettent par exemple un transfert bien plus élevé de CO_2 que d' O_2 . Cela est bénéfique pour la conservation de certains produits respirants comme les salades prêtes à consommer, et peut conduire à de meilleures conditions de conservation pour ces produits de « quatrième gamme ».

La deuxième concerne le domaine du réemploi. En effet, le mode de collecte, tri et recyclage des emballages à usage unique n'offre aucune place aux plastiques biosourcés, qui restent marginaux dans le flux global des déchets. En revanche, les voies de collecte, lavage et contrôle des emballages réemployables permettront plus aisément le développement de nouvelles filières, même de petite taille. Par ailleurs, le coût plus élevé des matières biosourcées constituerait un frein moindre dans le secteur du réemploi, qui peut absorber des coûts de production d'emballages plus élevés que le secteur de l'usage unique.

Le défi sera essentiellement technique. En effet, la réemployabilité des emballages nécessitera des caractéristiques de barrières aux contaminants (par exemple, absorption de toxines par un emballage souillé par un aliment contaminé puis rétro-migration de cette toxine lors des emplois ultérieurs) et de résistance thermique (lavage et séchage des emballages) qui ne sont clairement pas atteintes avec les plastiques biosourcés actuellement sur le marché. Néanmoins, le réemploi des emballages ne concerne pas que les emballages primaires (au contact du produit) : les contenants secondaires et tertiaires, utilisés pour les échanges entre entreprises ou concernés par l'unité de vente consommateur, pourront tout à fait être constitués de matières caractérisées

par de moindres performances. Par ailleurs, d'autres ressources renouvelables qui n'ont aucun intérêt technologique en tant que constituant d'emballage primaire trouveront des applications potentielles dans ce domaine des emballages secondaires ou tertiaires réemployables. C'est le cas, par exemple, des composites à fibres **lignocellulosiques**, qui allient performance mécanique et faible densité.

Les bioressources ont donc encore un fort potentiel de développement dans le domaine de l'emballage. Reste qu'un emballage biosourcé, pour être une option de substitution plus favorable, doit avoir des performances satisfaisantes (gaspillage produit) et un processus de production efficient d'un point de vue environnemental. L'échelle de production des matériaux biosourcés est souvent considérée comme une limite, car elle est beaucoup plus petite que celle des matériaux pétrosourcés. De plus, le bilan environnemental de leur production n'est pas favorable, notamment pour les consommations énergétiques mobilisées. Les défis les plus importants concernent les matériaux qui seraient les plus faciles à introduire sur le marché. Il est par exemple possible de produire du polyéthylène ou du polypropylène biosourcés de caractéristiques strictement analogues à leurs équivalents pétrosourcés. Les matériaux biosourcés pourraient donc en théorie se substituer totalement ou partiellement aux matériaux pétrosourcés sans aucun verrou technique supplémentaire, si ce n'est le développement de procédés de production moins énergivores et moins consommateurs d'eau.

ET SI TOUS LES EMBALLAGES ÉTAIENT (BIO)DÉGRADABLES ?

La biodégradabilité des emballages a longtemps été présentée comme la solution à privilégier pour répondre aux enjeux de pollution plastique : si tous les résidus accidentellement présents dans l'environnement étaient rapidement biodégradables, il n'y aurait pas de problématique d'accumulation, et notamment pas de formation de microplastiques qui contaminent la chaîne de production des ressources alimentaires. La position française sur

cette question a été explicitée dans le cadre de la stratégie 3R (Réduction, Réemploi, Recyclage), puisque la dégradation des plastiques biodégradables ou compostables n'y est pas considérée comme répondant à la définition de la valorisation. En effet, la matière est alors majoritairement transformée en CO_2 et n'est donc plus disponible pour fabriquer un nouveau produit. L'intérêt agronomique est en outre limité, car ils n'apportent ni N_2 , ni potassium, ni phosphore aux sols, et très peu de carbone. Toutefois, l'emballage en plastique biodégradable ou compostable pourrait présenter un intérêt s'il était au service de la valorisation organique en permettant d'augmenter les quantités de déchets organiques collectés comme avec des sacs de pré-collecte de biodéchets. L'intérêt n'est pas de composter l'emballage en lui-même, mais de contribuer à améliorer la valorisation organique des déchets qu'il contient. En revanche, la biodégradation est une solution pour les produits non désolidarisables de l'emballage (sachets de thé, étiquettes de fruits, etc.) ou pour les contenants de déchets végétaux. La biodégradation est donc une propriété d'intérêt lorsque l'emballage est intimement lié à un déchet organique hydraté. Dans le cas contraire (déchet sec, désolidarisable de l'emballage), sa biodégradabilité n'a pas d'intérêt.

Les emballages biodégradables constituaient une réponse possible à la présence accidentelle d'emballages dans l'environnement à l'origine de la pollution plastique. L'exclusion de la biodégradation dans la réglementation est motivée par un choix de communication qui se veut clair : il n'est pas possible de sensibiliser au recyclage et au réemploi des emballages, et parallèlement de fournir au consommateur des emballages susceptibles d'inciter au « mauvais geste ». Se pose alors la question de la mise au point de matériaux d'emballage présentant à la fois une aptitude au réemploi et au recyclage, mais qui, dans des conditions spécifiques, pourraient présenter des propriétés de dégradation dans l'environnement ne générant pas de résidus chimiques ou particuliers nocifs. La piste est considérée notamment à travers la formulation de matériaux incorporant des **enzymes** qui ne seraient pas actives dans la phase d'emploi d'un emballage à usage unique. Il sera beaucoup plus difficile d'obtenir un compromis viable pour un emballage réemployable, les phases

de lavage apportant des conditions favorables au déclenchement de l'activité catalytique des enzymes. Une autre piste susceptible d'amener à reconsidérer la question des matériaux biodégradables est celle des matériaux méthanisables. En effet, la conversion en méthane pourrait aboutir à des bilans environnementaux plus favorables que la conversion majoritaire d'un matériau en CO_2 . Mais les matériaux biodégradables actuellement développés ne se dégradent que très partiellement via un processus de méthanisation.

Du point de vue des usages, un matériau biodégradable, même si c'est uniquement dans des conditions spécifiques (comme les matériaux dits « compostables » tels que l'acide polylactique [PLA], qui ne se dégradent que dans des conditions sévères de température et d'humidité), est d'abord un matériau fragile chimiquement. Sa dégradation, nécessairement plus précoce et plus importante qu'un matériau traditionnel, entraîne des verrous techniques pour le maintien des propriétés fonctionnelles au cours du temps, notamment pour son inertie chimique (génération de composés de dégradation de faibles masses molaires susceptibles de migrer dans l'aliment).

ET SI TOUS LES EMBALLAGES ÉTAIENT RÉEMPLOYABLES ?

Le réemploi des emballages n'est pas une idée nouvelle. De tout temps, des contenants ont été utilisés de façon répétée, et la consigne de la bouteille de verre a été une pratique quasi généralisée jusque dans les années 1970. La bouteille en verre avait l'avantage d'être facilement lavable et inerte chimiquement, même à des températures élevées. Mais le verre est lourd, ce qui a un impact énergétique lors des étapes de transport. Les industries agroalimentaires l'avaient également progressivement retirée afin de mieux répondre aux exigences de maîtrise des corps étrangers. Le renouveau du sujet réside dans le fait que l'enjeu est de généraliser la pratique du réemploi à tous les types de contenants, mais aussi et surtout du fait que cette décision est prise à une période où la filière agroalimentaire a fait d'énormes progrès dans la maîtrise de la qualité des aliments, mais sur

la base de pratiques de conditionnement qui recourent à des contenants à usage unique...

Les enjeux des différentes situations de réemploi des emballages

Le réemploi de contenants remplis par l'industrie agroalimentaire et vendus aux consommateurs est certainement la situation la plus complexe. L'industriel doit réemployer un emballage pour lequel il a perdu toute traçabilité d'usage et d'emploi après la distribution du produit : mésusages du mode de préparation du produit, endommagements, utilisation du contenant pour des produits non alimentaires, emballage en contact long avec un produit contaminé... Cette situation est maîtrisable, les verrous ont été levés pour le réemploi des bouteilles consignées ; mais le type de produit (boissons) et la facilité de nettoyage et de désinfection de la bouteille en verre, ses critères et voies de contrôle, en font un cas technique plus simple à appréhender.

Le réemploi de contenants utilisés en restauration collective et pour les échanges directs entre professionnels est confronté à divers cahiers des charges qui ont comme avantage de garder la traçabilité de l'emballage. Le portage à domicile constitue une situation intermédiaire pour laquelle la perte de traçabilité est partielle.

La distribution en vrac amène à utiliser deux types de contenants qui vont faire l'objet de contacts répétés avec un produit : le dispositif de vrac lui-même et le contenant utilisé par le consommateur. Ce dernier fait l'objet de contacts multiples avec un produit, mais ses caractéristiques et la maîtrise des risques associés sont sous la responsabilité du consommateur.

Les points techniques clés liés au réemploi des emballages

La maîtrise de la fonctionnalité des emballages dans toutes les boucles d'emploi. L'intégrité de l'emballage et ses propriétés mécaniques, les fonctionnalités barrières et l'efficacité du système de fermeture doivent répondre au cahier des charges jusqu'au dernier emploi. La maîtrise des caractéristiques du système de fermeture constitue probablement le sujet le plus complexe. Les systèmes de fermeture ont en effet été conçus sur la base de l'usage unique

et devront être repensés pour satisfaire les performances après de multiples emplois et répondre aux critères d'inviolabilité.

La maîtrise du risque microbiologique. Les emballages souillés apporteront de nouveaux risques avec de nouveaux types de contamination. Les durées de vie devront être estimées pour des produits conditionnés dans des emballages nettoyés et désinfectés, mais dont les contaminations résiduelles auront des caractéristiques différentes. Le nettoyage-désinfection constituera une étape clé, avec des leviers de maîtrise à considérer au niveau du procédé lui-même et des méthodes de contrôle des emballages avant et après lavage. L'emballage devra résister aux conditions de traitement et présenter des caractéristiques de surface (rayures, rugosité, polarité de surface) ne favorisant pas l'accrochage des biofilms microbiens.

L'acceptabilité par le consommateur. Outre les contraintes associées aux nouveaux modes de collecte des emballages, le consommateur adhèrera ou non au réemploi dès son geste d'achat, d'où l'importance des critères d'aspect, pour lesquels il faudra déterminer les seuils d'acceptabilité ou faire évoluer ces seuils par des voies de communication et d'éducation adaptées. Si l'anneau de rayures est devenu une marque de reconnaissance des bouteilles en verre consignées et est accepté en tant que tel, la coloration de barquettes plastiques par des aliments, tolérée par le consommateur pour ses propres contenants domestiques, devrait être beaucoup moins acceptable lors d'un achat à arbitrer pour un produit industriel emballé.

La maîtrise du risque chimique. La coloration des contenants plastiques domestiques reflète le piégeage de substances chimiques dans la masse des matériaux d'emballage. Le phénomène serait anodin s'il restait limité aux substances contribuant à la coloration de certains aliments, mais il concerne un large éventail de composés potentiels. Il n'y aurait pas de problème si ces substances étaient éliminées par un simple lavage, ou au contraire restaient piégées dans la masse du matériau d'emballage. Mais tous les consommateurs ont fait l'expérience du « goût d'orange » d'une eau contenue dans une bouteille de soda « propre ». Cette « rétro-migration » des composés piégés par les matériaux d'emballage

questionne la gestion du risque chimique des emballages réemployés. Un emballage réemployable devra présenter le niveau barrière requis pour ne pas, selon ses conditions d'emploi, être contaminé à un niveau inacceptable ; dans le cas contraire, le procédé de nettoyage devra, outre sa fonction de retrait des résidus de surface et de décontamination microbiologique, contribuer à abaisser les contaminations chimiques sous les seuils acceptables. La décontamination des matériaux d'emballage est déjà un sujet appréhendé par les recycleurs de matières, le polyéthylène téréphtalate (PET), matériau constitutif de nos bouteilles d'eau, étant décontaminé sous très haute température. Cependant, la palette des procédés et des conditions de décontamination de matière (granulés de plastique par exemple) est beaucoup plus large que les processus de traitement envisageables pour décontaminer un objet (emballage réemployable) tout en conservant son intégrité. La décontamination chimique des emballages réemployables constituera un enjeu majeur pour les plastiques, particulièrement concernés par les phénomènes de piégeage, d'autant que le piégeage des contaminants n'est pas la seule question à traiter pour assurer la maîtrise du risque chimique des emballages plastiques réemployables. Si les usages répétés d'un emballage plastique conduisent (par épuisement) à la réduction de la migration de ses contaminants initiaux (comme le « goût de plastique » de la gourde neuve qui s'amenuise au cours du temps), le vieillissement à plus long terme du matériau d'emballage peut générer de nouveaux contaminants pour lesquels il faudra gérer le risque associé. Tout reste à construire, car la réglementation des matériaux au contact des aliments « connaît » les emballages à usage unique, les contenants à usage répété, mais pas les emballages réemployés. La qualification de la migration des emballages réemployables appellera nécessairement, outre la mesure de la migration initiale et des premiers emplois (assimilés à « répétés »), celle des emballages artificiellement vieillis par des procédures accélérées mimant l'ensemble des contraintes physiques et chimiques appliquées à l'emballage jusqu'à son dernier emploi.

Les impacts environnementaux (perspective technologique).
Si le réemploi d'un emballage fait l'économie des impacts



environnementaux intrinsèques liés à ses constituants et à son processus de fabrication, il engendre d'autres impacts liés aux étapes spécifiques de collecte, de nettoyage et de désinfection. Les impacts du circuit logistique sont évidemment très importants. Le transport des emballages est caractérisé par deux étapes, celle de la collecte et de l'acheminement vers le centre de lavage, et celle de la restitution de l'emballage à l'industriel utilisateur. Pour minimiser les kilomètres parcourus, deux modèles d'organisation sont envisagés. Le premier implique des circuits courts entre conditionnement des produits, consommation, collecte et lavage. Le second implique une distribution des produits à l'échelle nationale : les emballages sont collectés et lavés dans des centres régionaux, puis mis à disposition des entreprises dans un secteur géographique proche. Dans ce modèle, les entreprises utilisatrices sont différentes à chaque boucle d'emploi, ce qui impose l'utilisation d'emballages standardisés convenant à un large spectre de cahiers des charges produits. Pour ces deux modèles, l'impact logistique des emballages réemployables dépend principalement de la masse unitaire des emballages et de leur compacité d'empilement. Le premier critère favoriserait plutôt les plastiques et le second les formes d'emballages faciles à empiler. Le nettoyage est une étape pointée par les détracteurs du réemploi, qui mettent en avant les impacts environnementaux liés aux consommations d'eau. L'enjeu sera de définir les niveaux de nettoyage-désinfection strictement nécessaires pour la majorité des usages agroalimentaires, charge aux industriels de compléter le dispositif en tenant compte de leurs spécificités. Pour ne pas décontaminer par défaut, et donc par excès, le développement de technologies de contrôle permettant de définir le process juste nécessaire sera crucial. La sévérité des critères de tri pour la mise au rebut des emballages inaptes au réemploi sera déterminante pour minimiser les impacts environnementaux. Trop sévère, le tri augmentera directement l'impact environnemental par une mise au rebut inutile d'emballages ; insuffisamment sévère, il augmentera les pertes alimentaires pour cause d'invendus et de défauts de conservation de l'aliment. La conception de jumeaux numériques et des recherches académiques pluridisciplinaires seront nécessaires à ce niveau pour arbitrer les choix.

Les impacts environnementaux (perspective organisationnelle). Le nombre de boucles d'emploi réalisables et effectivement réalisées constitue un point pivot pour l'impact environnemental des emballages réemployables. En effet, les impacts environnementaux intrinsèques de l'emballage neuf initial sont distribués sur chacun de ses emplois. Plus le nombre d'emplois est élevé, plus les impacts intrinsèques de l'emballage à chacune des boucles seront faibles. Ainsi, on admet un comportement quasi asymptotique à partir d'une dizaine d'emplois, seuil à partir duquel l'impact environnemental de l'emballage est lié aux effets du lavage et de la logistique beaucoup plus qu'à ses impacts environnementaux initiaux. Faire un emballage supportant des milliers d'emplois successifs constituerait en revanche une surqualité, le nombre d'emplois maximal attendu étant entre 10 et 20, les consommateurs n'ayant pas un geste de tri 100 % efficace.

Les critères économiques. Conçus pour résister à plusieurs cycles d'emploi, les emballages réemployables devront être plus robustes mécaniquement que leurs homologues à usage unique. À matière identique, ils seront souvent 50 % plus épais. L'impact économique affecté à chaque boucle d'emploi étant d'autant plus faible que le nombre d'emplois est élevé, ces surépaisseurs appliquées aux emballages réemployables ont en réalité peu d'effet sur le bilan économique global. On envisage même de changer les matériaux d'emballage pour des matériaux très onéreux supportant un grand nombre de boucles d'emploi. Par exemple, la barquette inox pourrait remplacer la barquette plastique.

La recyclabilité des emballages réemployables. La loi AGEC impose l'existence d'une filière de recyclage pour les emballages réemployables. Cette condition va conduire à une forte homogénéisation des matières et des formes d'emballage en agroalimentaire. En effet, le recyclage nécessite une massification des flux pour être collecté, trié et valorisé sur la base de quantités économiquement viables. Cependant, le seuil de massification pour une filière de recyclage d'emballages réemployables devrait être beaucoup plus bas que les milliers de tonnes évoquées dans le domaine de l'usage unique.

Un emballage réemployable pourra donc être cher et possiblement constitué de matières non standards aujourd'hui. Il devra répondre à de nouvelles contraintes de maîtrise des risques chimiques et microbiologiques, à de nouveaux critères d'aspect et d'endommagement. Les recherches s'orientent vers de nouveaux matériaux, basés par exemple sur des polymères **thermostables** aujourd'hui non utilisés dans le domaine de l'emballage. Cela n'exclut pas d'explorer, *a contrario*, des emballages innovants avec très peu d'impact tels que les emballages plastiques souples, pour lesquels il faudra inventer des modes de fermeture/ouverture non destructifs et des voies efficaces de nettoyage-désinfection. Le cahier des charges de l'emballage à usage unique était complexe ; celui de l'emballage réemployable le sera davantage.

LES EMBALLAGES DU FUTUR : QUELS RISQUES POUR LA SANTÉ ?

Les nouvelles dispositions environnementales vont amener les industriels à faire évoluer leurs pratiques en matière de choix de matériaux et de conception des emballages. La recherche devra accompagner ces grandes conversions pour mieux anticiper les risques qui en résulteront pour la santé du consommateur. Les nouveaux matériaux, sélectionnés pour leur efficacité environnementale ou leur fonctionnalité d'intérêt, sont en effet susceptibles d'exposer les consommateurs à de nouveaux risques chimiques. Il ne s'agira pas uniquement de maîtriser les contaminants initiaux, mais également ceux qui pourront apparaître lors des emplois successifs de l'emballage.

Jusqu'à présent, le risque chimique associé aux matières recyclées était évalué dans « le pire des cas », c'est-à-dire dans les conditions les plus extrêmes auxquelles pouvait être soumis l'emballage (par exemple sa décontamination dans le cas du recyclage du PET des bouteilles d'eau). Les méthodes de maîtrise étaient conçues pour prévenir le risque dans cette situation de référence qui était censée constituer la situation de contamination chimique la plus défavorable. La réglementation applicable aux matériaux recyclés utilisés en contact alimentaire est en cours

d'évolution ; elle reposerait non plus sur la démonstration de la maîtrise de cette contamination initiale de référence, mais sur le contrôle systématique des matières sortantes du procédé de décontamination. Il s'agirait en quelque sorte d'une obligation de résultat qui impliquerait de réaliser une analyse de risque pour tout lot de produit. Si la législation imposait ce changement de paradigme, cela exigerait des progrès drastiques dans le domaine des méthodes d'analyse du fait de la complexité des situations rencontrées en pratique.

Tout matériau utilisé au contact des aliments est constitué d'une part de composants identifiés et évalués, mais également (et ce sera d'autant plus vrai pour les matériaux recyclés) de composants non introduits volontairement, présents à l'état de trace, et se comptant quelquefois par centaines. Comment identifier, quantifier et évaluer la toxicité de centaines de substances au cours d'une analyse simple et rapide ? Certains chercheurs pensent que l'analyse du risque associé à chaque substance devrait être possible en automatisant toutes les étapes analytiques et en utilisant l'intelligence artificielle pour reproduire ces opérations. Cette approche place la barre le plus haut en termes de progrès à réaliser. D'autres misent sur les « biotests ». Lanceurs d'alertes, ces tests pratiqués sur des cellules modifiées « s'allument » lorsqu'ils sont soumis à un extrait des matières à tester. Cette approche est la plus pragmatique, mais sa réponse n'est pas fiable à 100 % en raison de possibles faux positifs et faux négatifs. D'autres encore misent sur l'exploitation de « signaux d'empreintes » qui alerteraient sur une composition anormale. Ces tests visent à détecter une anomalie par rapport à une situation de référence censée relever d'un niveau de risque faible et acceptable. Ces trois approches ne sont pas à opposer ; un processus global de gestion du risque pourrait être envisagé lorsque les recherches auront progressé dans les trois domaines. Les techniques d'empreinte sont celles que l'on imagine les plus facilement mises en œuvre en contrôle usine. Puis, en cas d'alerte, les biotests pourraient prendre le relais pour qualifier les situations de composition anormale, et si cette dernière était associée à un effet indésirable, l'analyse exhaustive du risque, substance par substance, pourrait enfin être réalisée.

Mieux analyser les matériaux au contact des aliments n'a pas pour unique objectif d'arbitrer la conformité de lots industriels en cours ou en fin de production. L'identification, la quantification et l'évaluation des substances devraient permettre de mieux connaître les mécanismes à l'origine de la présence ou de la formation des composés indésirables. Cela devrait permettre de mieux synthétiser, formuler et transformer les matières constitutives de nos emballages en évitant ou en limitant les mécanismes incriminés.

LA JUSTE FONCTIONNALITÉ DE L'EMBALLAGE, UNE QUESTION DE COUPLE

Il faut bien différencier l'impact environnemental intrinsèque d'un emballage et celui du couple emballage-produit.

Les impacts environnementaux associés aux emballages concernent toutes les étapes d'obtention des matières, formulation, transformation et transport associées à la mise à disposition des contenants aux industriels, ainsi que la distribution des emballages (hors produit contenu) et les différentes modalités de leur fin de vie.

Les impacts environnementaux du couple emballage-produit sont beaucoup plus globaux. Ils concernent les impacts intrinsèques de l'emballage et les impacts environnementaux de l'ensemble de l'itinéraire technologique de production agricole, transformation et distribution des produits agroalimentaires. Cette seconde composante inclut la quantification du gaspillage des produits, qui est variable en fonction de la performance de l'emballage. Les impacts environnementaux du couple emballage-produit relèvent ainsi de données liées à l'emballage d'une part, au produit d'autre part, mais aussi à l'effet de l'emballage sur le gaspillage du produit.

Si un emballage est sous-dimensionné d'un point de vue fonctionnel, les impacts environnementaux du couple emballage-produit se révéleront trop élevés du fait d'un gaspillage produit évitable. S'il est surdimensionné, les impacts environnementaux

du couple emballage-produit se révéleront trop élevés du fait d'un impact intrinsèque de l'emballage superflu. Le « juste emballage » correspond donc au minimum observé pour la somme de ces deux sources d'impacts environnementaux.

Identifier le « juste emballage », c'est identifier les (justes) propriétés requises pour assurer les fonctions de conservation et de sécurisation du produit au cours de la durée de vie ciblée. La remise en question des emballages actuellement utilisés a révélé une mauvaise connaissance des véritables cahiers des charges. Les emballages ont été progressivement améliorés dans des démarches d'innovation incrémentale, d'où une réelle difficulté à remplacer aujourd'hui des emballages existants par d'autres modalités (matériaux et géométries) totalement différentes. Il y a donc encore d'importants enjeux de caractérisation et d'anticipation du comportement des produits soumis à différentes configurations de conservation et de préservation. Les outils à développer sont autant des méthodologies de mesure et de vieillissement en conditions contrôlées que des outils numériques utilisés pour les approches prédictives.

Enfin, la recherche du « juste emballage » peut recourir à des réglages encore plus fins quant aux propriétés recherchées. Lorsque les caractéristiques du produit sont variables et que le procédé ne permet pas de lisser son comportement, un ajustement des propriétés de l'emballage est envisageable. C'est ce que l'on pratique depuis longtemps pour conserver des produits végétaux frais qui nécessitent des niveaux de perméabilité variables, ajustés grâce à une perforation « à façon » des emballages. C'est ce que l'on pratique aussi, avec plus de précision, pour adapter la respiration de l'emballage à l'échelle d'un lot fabriqué (effets de la saisonnalité et des cultivars sur la respiration des végétaux). Les emballages perforés respirants ont ainsi des propriétés variables, bien que conçus sur la base d'un matériau unique. L'homogénéisation des matériaux d'emballage, qui vise à simplifier le dispositif industriel de recyclage, imposera de généraliser cette approche. Il ne sera plus possible de choisir un emballage pour une application donnée. Il faudra, sur la base de quelques types d'emballages optimisés pour leur recyclabilité, savoir atteindre, par des procédés de fonctionnalisation,

différentes gammes de propriétés ajustées pour les besoins de l'application. La recherche sur les emballages sera à l'avenir moins une science de conception d'un (multi)matériau qu'une science de fonctionnalisation d'emballages existants.

Dans le domaine de l'usage unique, rechercher la juste fonctionnalité d'un emballage consistait le plus souvent à simplifier les emballages en sélectionnant les fonctions essentielles. L'emploi multiple apporte son lot de nouvelles contraintes techniques, mais aussi des possibilités de distribuer les impacts environnementaux sur l'ensemble des itinéraires. Ainsi, les emballages « intelligents » (apportant des indications sur le parcours ou la qualité du produit) vont être reconsidérés comme des options intéressantes pour le réemploi, d'autant plus que l'acceptabilité des coûts des emballages réemployables évoluera vers des niveaux plus élevés et que le réemploi appellera de nouvelles exigences en matière de traçabilité. Ces choix complexes demanderont la formation d'ingénieurs ayant une vision large et qui pourront s'appuyer sur des systèmes d'aide à la décision développés par la recherche.

Les emballages domestiques ne devraient pas être les premiers à être concernés par cette possible « modernisation ». Plus tracés, plus faciles à récupérer, avec des taux de réintroduction dans les cycles d'emplois proches de 100 %, les emballages réutilisables d'échanges entre les acteurs d'une filière devraient très fortement se développer dans les années à venir. Ils bénéficieront d'un contexte particulièrement propice : développement émergent d'une filière de responsabilité élargie des producteurs, politiques incitatives au développement du réemploi, automatisation des parcours de production avec le développement de l'usine numérique... Une substitution très rapide des cartons de regroupement des unités de vente par des contenants instrumentés réemployables, qui assureront dans un premier temps des fonctions logistiques de base, puis des fonctions de traçabilité, et enfin des fonctions de conservation peut être anticipée. Et si le conditionnement contribue à mieux conserver le produit, il sera possible de « déshabiller » l'emballage primaire, c'est-à-dire celui directement au contact du produit. Moins fonctionnel mais plus facile à recycler, l'emballage primaire bénéficiera du

report d'une partie de ses fonctions sur le conditionnement, ou emballage secondaire. Logique du point de vue de la gestion des déchets : pourquoi amener jusqu'au consommateur l'emballage le plus complexe qu'il sera ensuite difficile de récupérer, trier et valoriser ?

Mieux conserver le produit grâce aux emballages secondaires jusqu'au point de distribution, c'est toutefois aussi moins bien le conserver au-delà de ce point. Mais est-ce réellement un problème ? Est-ce que réduire la durée de vie au-delà du point de distribution n'est pas en phase avec l'évolution des modes d'achat et de consommation de plus en plus instantanés ? D'ailleurs, pourquoi ne pas se poser la question de la réduction de la durée de vie des produits ? La boussole de l'augmentation des durées de vie des produits a toujours guidé l'innovation dans l'industrie agroalimentaire, l'idée étant qu'une durée de vie plus longue est nécessairement plus optimisée. Une règle simple de répartition de cette durée de vie est même admise dans le secteur : un tiers pour le fabricant du produit, un tiers pour la distribution et un tiers pour le consommateur. Les évolutions des modes de distribution et de consommation amènent à revenir sur ces principes ; les modes de conservation alternatifs, la numérisation des parcours de production et de distribution, les nouveaux consommateurs nomades ou utilisateurs de nouveaux circuits de production et d'approvisionnement sont autant de facteurs qui amèneront à reconsidérer la question de façon globalisée. Différentes options pourront être envisagées, mais elles auront très certainement pour base commune une révision à la baisse des durées de vie. Il faudra concevoir des emballages minimalistes adaptés à des itinéraires technologiques minimalistes.

Les emballages réemployables et intelligents pour l'échange entre les acteurs vont révolutionner le métier de la distribution. Mais la complexité des connaissances en sciences des aliments ne va pas uniquement conduire à concevoir des emballages de haute technologie. La technologie peut aussi être du côté du produit. Au cours de leur conservation, les produits alimentaires génèrent ou consomment des gaz simples et des composants organiques ; certains de ces produits peuvent accélérer le vieillissement du produit, d'autres, au contraire, peuvent contribuer



à sa stabilisation. Les emballages actifs ont ainsi pour objectif d'intervenir sur ces mécanismes afin de minimiser les phénomènes de dégradation ou de maximiser ceux qui améliorent la conservation du produit. Il y a des voies plus subtiles pour intervenir sur les mécanismes de vieillissement des produits alimentaires : l'emballage peut contribuer à « filtrer » sélectivement les composants volatils pour générer spontanément la composition gazeuse la plus adaptée à la conservation du produit dans le volume gazeux interne à l'emballage. Le choix de la composition du produit peut théoriquement lui-même être également valorisé pour ajuster ces mécanismes de production et de consommation de composants volatils. L'exemple le plus simple est l'ajout de ferments, qui contribuent à la biopréservation du produit (acidification, production de nisine), à la consommation d'O₂ et au dégagement de CO₂, deux phénomènes souvent recherchés pour la stabilisation des produits conservés en froid positif. Le champ de recherche dans ce domaine est large. Il s'agira d'une part de modéliser et contrôler des mécanismes très complexes d'évolution des produits alimentaires et d'autre part d'ajuster très finement les propriétés de perméabilité sélective des emballages vis-à-vis des composants volatils ciblés.



LA CONSERVATION AU CŒUR DE LA TRANSITION ALIMENTAIRE ?

Les parties précédentes ont discuté des liens entre durabilité et conservation sous un angle plutôt technique, celui de l'effet des procédés de conservation sur les qualités des produits, les consommations d'énergie et d'eau, ou de leur impact sur le réchauffement climatique. Cette partie a pour objectif de situer les problèmes liés à la conservation des aliments dans une perspective de durabilité plus large, et à l'échelle mondiale, en relation avec les objectifs de développement durable promus par l'Organisation des Nations Unies. La transformation et la conservation des aliments sont en effet à envisager dans une perspective mondiale, qui recouvre la sécurité alimentaire et notamment les comparaisons Nord-Sud (Kondjoyan *et al.*, 2022), la durabilité des villes et des territoires et la responsabilité des acteurs impliqués dans la production et la consommation. Cette partie abordera plus précisément trois questions : le lien entre la conservation et l'évolution vers des pratiques agricoles plus durables, la nécessité de développer de nouvelles combinaisons de procédés et d'emballages acceptées par le consommateur et adaptées à son comportement, et l'évaluation de l'impact environnemental de la conservation aux différentes échelles territoriales. Elle montrera enfin comment les outils d'intelligence artificielle et d'aide à la décision pourront contribuer à rendre les stratégies de conservation plus durables.

LE LIEN AMONT-AVAL ET L'IMPACT DES PRATIQUES AGROÉCOLOGIQUES

Pour la plupart des produits animaux et de nombreux produits végétaux, l'étape de l'élevage et de la pêche ou de la production agricole est celle qui a le plus d'impacts sur l'environnement. Il est donc important d'analyser l'impact de la conservation des



produits en considérant l'ensemble de la chaîne alimentaire, et pas seulement les étapes allant de la transformation à la consommation. Ainsi, l'action de certains micro-organismes ou certaines conditions d'élevage, de culture et de récolte peuvent impacter fortement les pertes et gaspillages de produits en aval de la chaîne, même lorsque le micro-organisme ou les marqueurs des réactions liées aux conditions de culture ou d'élevage ne sont plus détectables. L'impact des conditions initiales sur la conservation ultérieure du produit est particulièrement sensible pour certaines espèces de micro-organismes qui produisent des **enzymes** ou des toxines résistantes à la chaleur et/ou à la **protéolyse**, et qui persistent et restent actives dans l'aliment même après l'action de procédés d'épuration microbienne ou de la fermentation. C'est le cas, par exemple, de certaines souches de *Pseudomonas aeruginosa*, une bactérie environnementale qui se développe partout et au froid et est capable de produire une enzyme de dégradation de certaines protéines du lait qui résiste à la température. Lorsqu'un lait a été contaminé par *P. aeruginosa* (le plus souvent lors du stockage à la ferme dans les tanks réfrigérés) et que la souche a eu le temps de produire son enzyme, cette dernière restera active et pourra dégrader les protéines du lait même après un traitement UHT. Il en résulte une déstabilisation du lait, certaines protéines coagulant et formant peu à peu un caillé au fond des bouteilles lors du stockage. Rien de dangereux à cela, ce n'est pas une toxine, mais le lait est alors considéré par le consommateur et l'industriel comme impropre à la consommation, et donc perdu, ce qui conduit à du gaspillage et a un impact délétère sur l'image de la marque. De même, certaines souches de *Staphylococcus aureus*, bactérie pathogène, contaminent les matières premières, y croissent et y trouvent parfois des conditions favorables à la production de toxines susceptibles de provoquer des troubles intestinaux (ex. : entérotoxines staphylococciques). Ces dernières sont responsables de toxi-infections alimentaires se manifestant par des vomissements, parfois accompagnés de diarrhées, quelques heures après l'ingestion d'aliments contaminés. Or, ces toxines sont des protéines très résistantes à la chaleur et à la protéolyse. Là aussi, un traitement d'épuration bactérienne, même drastique, ne les élimine ni ne les inactive. Même exempt de toute bactérie

(par exemple après **appertisation**), le produit reste impropre à la consommation. Il faut donc veiller à la qualité sanitaire des produits dès le début et tout au long de la chaîne de production-transformation, de façon à prévenir ce genre de risques.

Autre évolution dans le monde agricole, la prise en compte du bien-être animal et sa traduction dans l'évolution des systèmes d'élevage, qui peuvent avoir des répercussions sur la variabilité de la matière première, incluant la charge microbienne. Ainsi, le passage de systèmes d'élevage en cage à des systèmes en plein air et/ou au sol pour la production d'œufs et d'ovoproduits expose les poules pondeuses à un environnement changeant et induit des modifications de qualités technologiques, fonctionnelles (par exemple, capacité moussante ou émulsifiante, etc.) et microbiologiques des œufs qui impactent l'aval de la filière. Peu d'études sont encore disponibles pour bien évaluer ces impacts, mais il n'est pas exclu que cela requière quelques adaptations, notamment en matière de **pasteurisation**, pour maintenir un niveau correct de conservation de ces denrées sensibles.

DÉVELOPPER DE NOUVELLES COMBINAISONS DE PROCÉDÉS ET D'EMBALLAGES EN LIEN AVEC LE COMPORTEMENT DU CONSOMMATEUR

Les technologies de traitement et de conservation doivent être optimisées et combinées aux actions mises en place pendant l'étape de production agricole pour garantir une bonne conservation des produits en tenant compte du comportement du consommateur. Dans cette perspective, il est important de cibler des produits et des étapes des systèmes alimentaires qui ont un fort impact sur la durabilité. Par exemple, diminuer la perte en viandes fraîches, qui ne représentent pourtant en Europe qu'un faible pourcentage de la quantité abattue, peut diminuer fortement l'impact de la consommation alimentaire sur l'environnement. On estime en effet que des pertes et gaspillages de viande de bœuf de 3,5 % en masse dans un supermarché équivalent à 29 % des pertes alimentaires totales de ce même supermarché lorsqu'elles sont traduites en empreinte carbone. Il est donc impératif de trouver des solutions pour maîtriser la



dégradation du produit qui, dans le cas des viandes, est intimement liée à la croissance de la flore microbiologique présente en surface des carcasses. Cette maîtrise de la croissance de la flore de surface peut être obtenue en appliquant une succession de mesures barrières, qui associent des conditions strictes d'hygiène à une optimisation de l'utilisation du froid et des emballages. Des solutions complémentaires peuvent être recherchées avec l'application de traitements thermiques pour décontaminer la surface des muscles en utilisant de la vapeur, éventuellement surchauffée, qui peut être associée à l'utilisation de composés chimiques « naturels », issus par exemple du métabolisme musculaire des animaux (acide lactique), ou à des extraits de plantes.

Des modèles mathématiques peuvent être utilisés pour trouver les meilleures combinaisons de procédés possibles et les conditions optimales de leur application. Mais pour être efficace, cette optimisation technologique doit être associée à la perception qu'a le consommateur de l'évolution de la qualité du produit et à sa stratégie de stockage à domicile. Ainsi, la perception de la qualité du produit, par exemple celle du seuil de dégradation de la couleur à partir duquel un aliment encore consommable est rejeté, peut varier entre les catégories de consommateurs et entre les pays. Le comportement du consommateur à domicile est souvent un élément clé de la durabilité. Dans le cas des viandes fraîches, la majorité des pertes et gaspillages a lieu à ce niveau. L'évolution socio-économique d'un pays vers plus de richesse doit également être prise en compte. Dans les pays chauds, où l'utilisation du froid est chère et très coûteuse en énergie, les viandes étaient traditionnellement séchées, salées, saumurées, acidifiées pour pouvoir être conservées. La modernisation de certains de ces pays conduit les classes les plus aisées à privilégier les produits frais ou moins transformés (moins salés, moins séchés et de texture plus douce). C'est d'ailleurs l'évolution qui s'est produite en Europe pour les poissons fumés. Ces évolutions nécessitent l'utilisation du froid et/ou un bien meilleur contrôle de la stabilité du produit, qui repose en grande partie sur une meilleure maîtrise des procédés (formulation, séchage et conservation), en particulier lorsqu'il s'agit de produits épais. Les analyses de type ACV peuvent participer à l'éducation et à

l'évolution du comportement des consommateurs. Une prise de conscience de l'impact de leurs habitudes sur l'environnement pourrait les amener à favoriser les scénarios les plus vertueux. Des différences culturelles fortes peuvent persister en fonction de la classe sociale et de la nationalité des consommateurs. Ainsi, l'application de rayons Y, ou X, très efficace pour décontaminer microbiologiquement des fraises, peut être acceptée par un consommateur américain, très sensible à l'aspect visuel du produit et à son risque microbien, tandis qu'elle sera immédiatement rejetée par le consommateur européen.

Une des difficultés majeures des ACV dans le domaine agro-alimentaire est le rôle crucial, mais très mal documenté, du consommateur final. Le point principal concerne les pertes et gaspillages, estimés à 8,8 millions de tonnes de déchets alimentaires en France en 2021 selon la définition des pertes et gaspillages utilisée dans les statistiques européennes. Ces statistiques montrent une contribution majeure des ménages, avec une estimation de 47 % des volumes de déchets alimentaires, soit 60 kg par personne et par an, dont environ la moitié est comestible (gaspillage au sens strict) (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2024). Une étude de l'ADEME de 2016 estimait quant à elle la part des ménages à 33 %, avec un cadre de comptabilisation légèrement différent (Income Consulting — AK2C, 2016). Or, ce qui est jeté par l'utilisateur final (le consommateur) inclut tous les impacts de la production, de la logistique et de la transformation, et est donc particulièrement significatif. Cette enquête de l'ADEME avait le grand intérêt de comparer les pertes et gaspillages par filières et, de ce fait, de proposer des pistes de progrès. Ainsi, pour le blé tendre, la plus grosse part intervient à l'étape de la vente de pain, la salade, fragile, subit des pertes beaucoup plus importantes (57 %) que les petits pois et haricots verts (10 %), essentiellement commercialisés en conserves ou surgelés.

L'analyse du comportement des consommateurs reste importante, même quand une grande partie des pertes se situe immédiatement après la récolte, comme pour les fruits et légumes sensibles. Des travaux menés sur les fraises ont permis de fixer le pourcentage de dégradation de l'aspect du produit au-delà duquel les barquettes étaient rejetées par le consommateur. Un

modèle mathématique a été développé en parallèle pour simuler numériquement la dégradation des fraises au domicile du consommateur en fonction du type d'emballage et des conditions de stockage. Le comportement des consommateurs a ensuite été analysé à domicile par questionnaire. Près de 80 % d'entre eux retiraient l'emballage juste après l'achat et 57 % stockaient les fruits à température ambiante, tandis que 43 % les conservaient au réfrigérateur. Le modèle mathématique a ensuite été utilisé pour simuler les pertes et le gaspillage de produits dans un très grand nombre de scénarios, incluant différentes conditions de stockage post-récolte et prenant en compte les écarts de comportement des consommateurs. L'utilisation d'un emballage intelligent sous atmosphère modifiée pouvait réduire de 17 % les pertes de fraises par rapport à celui d'un emballage macroperforé classique. Cette faible réduction s'explique par le fait que la moitié des consommateurs ouvraient l'emballage sous atmosphère modifiée avant de ranger les fruits dans le réfrigérateur, ce qui annihilait les avantages de cet emballage sophistiqué. Les simulations ont également montré que la réduction des pertes aurait pu être de 74 % si tous les consommateurs avaient conservé l'emballage intact et stocké les fraises au réfrigérateur. L'évaluation environnementale par ACV a montré, quant à elle, que la stratégie mobilisant l'emballage à atmosphère modifiée avait un impact environnemental moindre si elle n'était pas associée au froid et si les consommateurs ne retiraient pas l'emballage.

L'utilisation d'emballages, même onéreux, peut également augmenter la durabilité de la conservation d'un produit quand il contrebalance des habitudes ancrées de pertes et gaspillages. Par exemple, une étude sur la consommation de café a montré que les capsules monodoses aluminium conduisaient à moins d'impacts environnementaux qu'un mode de consommation classique de café, préparé à partir d'une cafetière de format familial (Viana *et al.*, 2023). Pourtant, les impacts intrinsèques des paquets de café sont logiquement moins élevés que ceux des dosettes aluminium. Cette étude a en réalité fondé son raisonnement sur le comportement des consommateurs qui utilisent une cafetière traditionnelle. En effet, la plupart des consommateurs jettent à l'évier une part importante du café préparé, et les

impacts environnementaux associés à ce gaspillage sont beaucoup plus importants que ceux associés au type d'emballage utilisé. Cette étude amène à souligner différents éléments : le comportement du consommateur peut influencer fortement le bilan environnemental ; la consommation fractionnée du produit peut constituer une réponse au gaspillage alimentaire associé à l'étape consommateur ; plus un produit transformé présente des impacts intrinsèques importants (c'est le cas pour la production du café ou pour celle des viandes), plus il est important de réfléchir et d'innover en matière de conservation et de consommation pour contribuer à une filière plus durable.

ÉVALUER L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PRATIQUES DE TRANSFORMATION-CONSERVATION AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES TERRITORIALES

Les systèmes alimentaires ancrés localement suscitent souvent des espoirs élevés sur le plan de la durabilité. Cependant, ces attentes ne sont pas toujours alignées et ne sont pas toujours vérifiées. Bien que la littérature démontre les avantages sociaux des circuits courts, en particulier à une échelle locale, les impacts économiques et environnementaux varient considérablement. De plus, les dimensions santé/nutrition et gouvernance demeurent largement sous-explorées.

Les systèmes alimentaires locaux sont souvent associés à des consommateurs qui achètent des produits bruts, puis les transforment et conservent à domicile. Néanmoins, les pratiques des consommateurs en cuisine sont peu documentées, et leurs impacts, notamment environnementaux, encore moins. Une étude récente a été menée sur des pizzas en considérant un échantillon de soixante-neuf consommateurs (Cortesi *et al.*, 2023). L'incidence des pratiques culinaires sur les impacts environnementaux des pizzas au jambon-fromage et au fromage, élaborées selon trois méthodes de fabrication distinctes (industrielles, assemblées à domicile et entièrement faites maison), a été évaluée à l'aide d'une ACV. Certains impacts environnementaux étaient davantage influencés par les ingrédients présents dans

LES SYSTÈMES ALIMENTAIRES TERRITORIALISÉS

Les systèmes alimentaires territorialisés sont souvent décrits comme l'ensemble des acteurs opérant dans une même zone géographique (du niveau régional au niveau intercommunal), produisant, traitant, vendant, faisant circuler, achetant et consommant des produits alimentaires de cette zone. Ces systèmes incluent les circuits courts locaux. Selon la définition française, un circuit court implique au maximum un intermédiaire entre l'agriculteur et le consommateur, ce qui concerne une exploitation sur quatre en France. D'après la définition européenne, il s'agit de chaînes d'approvisionnement comptant un nombre limité d'opérateurs économiques engagés dans la coopération, le développement économique local, et entretenant des relations étroites entre producteurs, transformateurs et consommateurs.

la recette que par le mode de préparation. Ainsi, la pizza au fromage engendrait plus d'impacts que la pizza jambon-fromage. Cela souligne la prédominance de l'élevage dans les impacts environnementaux des produits alimentaires. Pour d'autres impacts, en particulier ceux liés à la consommation électrique, la préparation entièrement domestique avait tendance à générer des impacts plus élevés que la fabrication industrielle. Ceux-ci dépendaient toutefois largement des pratiques individuelles des consommateurs, lesquelles pouvaient varier considérablement d'un individu à l'autre, notamment en ce qui concerne le temps de préchauffage du four et la gestion des restes. Cette variabilité des comportements exerçait une influence significative sur les impacts environnementaux totaux des pizzas. Par exemple, la disparité dans la durée d'utilisation du four domestique se traduisait par un doublement de certains impacts environnementaux à l'échelle du cycle de vie des pizzas. D'autre part, la perception qu'avait le consommateur de l'impact environnemental de ses pratiques ne correspondait pas toujours à la réalité et pouvait être reliée à son appréciation sensorielle du produit. Ainsi, à la suite des dégustations, les consommateurs exprimaient une préférence gustative pour les pizzas « faites maison » et les percevaient comme ayant moins d'impact sur l'environnement, ce

qui divergeait des résultats de l'ACV. Cela illustre la nécessité d'informer les consommateurs sur l'impact environnemental réel de leurs pratiques culinaires afin de les amener à adopter des comportements plus vertueux, notamment en lien avec l'articulation gaspillage/emballages, comme évoqué plus haut dans les cas des fraises et du café.

La reterritorialisation de l'alimentation s'accompagne également de la nécessité d'adapter les procédés de conservation aux variations des matières premières et des usages induites par la disponibilité locale des matières premières, les changements de systèmes de production, la complexité des relations entre les acteurs du système actuel, les attentes des consommateurs sur le territoire, le changement climatique, etc. Cela peut conduire à repenser les transformations à des échelles plus petites, comme dans le cas des légumeries, des conserveries ou des abattoirs mobiles. De nombreuses initiatives se développent, sans que nous ayons une vision claire, ni des facteurs et conditions de réussite, ni de l'impact réel de ces initiatives sur la durabilité, notamment environnementale, des systèmes alimentaires.

Au-delà d'une réduction d'échelle de transformation et de conservation, la reterritorialisation de l'alimentation peut induire un changement plus structurel dans les façons de transformer et de conserver. Par exemple, dans un système local, il n'est pas nécessairement utile de conserver plus longtemps : le rapprochement entre production et consommation peut permettre de limiter l'utilisation des traitements de conservation les plus consommateurs en énergie et en eau, ainsi que le recours aux emballages sophistiqués. Il ne faut néanmoins pas penser qu'une alimentation reterritorisée pourrait se passer de transformation et de conservation. Disposer d'outils de transformation adaptés à une alimentation reterritorisée constitue donc une clé pour le déploiement de ces systèmes alimentaires. La reterritorialisation permet d'envisager plus aisément des solutions telles que le réemploi pour réduire l'usage des emballages (voir « Quel rôle pour les emballages ? »). Afin de favoriser une utilisation circulaire des ressources, la réutilisation des bouteilles renaît dans des pays où cette pratique avait progressivement disparu au cours des dernières décennies. La reterritorialisation de l'alimentation peut

aussi jouer un rôle important dans l'application des réglementations sur les emballages, le verre n'étant pas la seule option à envisager pour les réemplois. Le développement d'emballages réemployables plus légers peut ainsi rebattre les cartes du point de vue des périmètres concernés par les circuits de distribution alimentaire.

La relocalisation de la production et de la transformation agricole et alimentaire peut mettre en péril des circuits commerciaux régionaux ou internationaux établis. Son bénéfice du point de vue des impacts environnementaux est donc âprement débattu et donne lieu à des résultats parfois surprenants. Il faut garder à l'esprit que l'amont agricole est généralement responsable de la majeure partie des impacts environnementaux des systèmes alimentaires. De manière relativement contre-intuitive, les impacts associés au transport sont généralement faibles dans les chaînes longues, car la logistique y est très optimisée. Cela n'est pas toujours le cas dans les circuits courts ou locaux, caractérisés par de nombreux déplacements des producteurs ou des consommateurs pour de faibles volumes transportés. Il en va de même pour les étapes de transformation qui, à l'échelle de la chaîne de valeur, génèrent des impacts relativement faibles par rapport à l'amont agricole. Ainsi, lorsqu'on compare les impacts environnementaux de productions issues de chaînes longues et courtes, ce sont généralement les pratiques de production agricoles qui sont déterminantes, et non les distances de transport ou les modes de transformation et de conservation. Des études ont par exemple montré que les impacts environnementaux du mouton néo-zélandais (élevage extensif) importé à l'état congelé pouvaient être du même ordre de grandeur, voire plus faibles, que les impacts d'un mouton élevé dans un système d'élevage plus intensif aux États-Unis ou en Europe (Mazzetto *et al.*, 2023), ou encore que les impacts environnementaux d'une tomate marocaine, cultivée en serre non chauffée, étaient moindres que ceux d'une tomate française ou hollandaise cultivée sous serre chauffée.

Il faut souligner que les agriculteurs participant aux circuits courts tendent généralement à adopter des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement, telles que l'agroécologie et l'agriculture biologique. Il est donc tout à fait possible d'associer

production locale et pratiques agricoles vertueuses. Cependant, les grandes enquêtes quantitatives sont rares, se focalisent principalement sur les exploitations agricoles et ne prennent pas en compte les pratiques des intermédiaires (transformateurs, distributeurs, services logistiques, etc.), ce qui pourrait nuancer les effets observés. C'est pourquoi la reterritorialisation de l'alimentation doit être accompagnée de données et d'analyses permettant d'évaluer son impact réel sur la durabilité. Elles manquent cruellement aujourd'hui, à l'exception d'études concernant la dimension sociale (par exemple, Chiffolleau *et al.*, 2020). Un débat persiste sur les méthodes et les indicateurs nécessaires pour évaluer la durabilité des circuits courts de proximité, à la fois au niveau de la chaîne alimentaire et à l'échelle territoriale/régionale des systèmes alimentaires territorialisés. L'ACV, qui reste la méthode d'évaluation environnementale de référence, est controversée car elle ne prend actuellement pas en compte tous les dommages environnementaux, notamment sur la biodiversité. Il est donc impératif de produire davantage de données quantitatives, de revoir et d'améliorer les méthodes existantes, et de développer de nouvelles approches. Cela permettra de comprendre comment ces systèmes peuvent agir en tant que leviers pour changer les comportements des consommateurs et les systèmes alimentaires vers des pratiques plus durables, et de repenser l'articulation entre local et global, ainsi qu'entre chaînes courtes et longues. Les outils ACV restent assez lourds à mettre en œuvre et donc difficiles à utiliser par certains acteurs clés des filières agroalimentaires. Développer des outils simplifiés, orientés vers des applications particulières et pouvant être utilisés par des petites structures, serait donc important pour que ces acteurs choisissent les comportements les plus adéquats. Des travaux sont par exemple en cours pour développer des outils applicables aux circuits de recyclage des emballages en verre locaux ou régionaux.

Enfin, l'évaluation de la durabilité des méthodes de conservation risque de devenir un élément clé dans l'établissement de règles de calcul internationales concernant la durabilité des systèmes de production-consommation à l'échelle globale. Ces éléments seront stratégiques, car ils pourront entraîner des comportements protectionnistes plus ou moins déguisés (taxe carbone). Ils seront

donc l'objet d'après débats, au même titre que certaines normes et règlements sanitaires, à l'image des débats que suscite déjà l'affichage environnemental des produits alimentaires.

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LES OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION AU SERVICE DE LA DURABILITÉ DES SYSTÈMES

Une manière de diminuer les pertes et gaspillages est de mieux gérer les flux au long de la chaîne alimentaire et de ne pas jeter des produits qui sont encore consommables, c'est-à-dire sains et sûrs. Les programmes de redistribution d'aliments sur le point d'expirer entrent dans cette catégorie d'actions, qui pourraient devenir de plus en plus efficaces avec la transition numérique. Le développement numérique permettra en effet de tracer les produits du champ à l'assiette et de mettre à disposition des plateformes de stockage-distribution des aliments, afin que les consommateurs puissent accéder à des offres différenciées selon les dates de péremption. En outre, le développement d'outils de stockage et de transformation domestiques « connectés et intelligents » assurera un minimum de pertes à la maison comme au restaurant.

L'intelligence artificielle et les techniques de modélisation peuvent également aider à fiabiliser et mieux contrôler les procédés, diminuant ainsi les pertes et gaspillages. Par exemple, une des causes majeures de pertes et gaspillages liés à une mauvaise conservation des produits est la rupture de la chaîne du froid. Les ruptures de chaîne du froid sont souvent difficiles à détecter et leurs conséquences imprévisibles. Des intégrateurs colorimétriques, dont la couleur varie en fonction de la température, peuvent être placés dans l'emballage. Ils indiquent bien qu'un problème a eu lieu, mais ils ne permettent ni de le localiser dans la chaîne du froid ni d'en mesurer l'ampleur. La généralisation des capteurs sans fil, qui peuvent être embarqués pour suivre les chargements des produits alimentaires et gérés à distance grâce à l'Internet des objets (IoT en anglais), devrait permettre d'améliorer les détections de rupture de chaîne du froid et leurs

conséquences. Cependant, les mesures sont souvent effectuées dans l'air qui environne le produit ou en quelques points du chargement seulement. Elles doivent donc être interprétées pour en évaluer la portée et décider des actions correctives. Les actions sont plus simples à choisir lorsqu'il ne s'agit que d'appliquer des températures réglementaires, comme c'est souvent le cas pour les viandes et les poissons. Pour les produits tels que les fruits et légumes, non sujets à un cadre de températures réglementaires, les actions correctives de type « baisse de la température de consigne » (voir « Peut-on aller vers un froid plus durable ? ») doivent être mises en regard de l'augmentation de la consommation énergétique. Le développement des techniques d'intelligence artificielle semble donc pertinent, mais ces dernières nécessitent énormément de données, surtout lorsqu'il s'agit de couvrir des produits, des équipements et des conditions de transport et de stockage réfrigérés variés. Obtenir une masse de données expérimentale large et réaliste est très chronophage et coûteux, et ces algorithmes sont encore loin d'être entièrement fiables. Ils peuvent en effet conduire à des actions de correction inappropriées, car liées à des ruptures de la chaîne du froid sans conséquence sur la qualité du produit, ou à des actions correctives trop importantes, dont les bénéfices potentiels sur la réduction des pertes et gaspillages ne justifient pas l'augmentation du coût énergétique. Ils sont également limités par le fait qu'ils sont en général basés sur la seule mesure de la température de l'air. Des algorithmes de classification capables de prendre en compte les caractéristiques des écoulements d'air, des installations frigorifiques et de leurs chargements devraient permettre d'améliorer leur fiabilité et leur pertinence.

La recherche d'un meilleur contrôle de la chaîne du froid n'est qu'un des domaines dans lesquels l'intelligence artificielle pourrait améliorer la conservation des produits. Cette technologie sera de plus en plus utilisée pour prédire la qualité et la sécurité des aliments, d'autant plus que pour faire des économies d'énergie, on aura tendance à augmenter la température de conservation. Il sera donc crucial d'utiliser la modélisation et l'intelligence artificielle pour piloter parfaitement ces augmentations de température tout en assurant la sécurité sanitaire des produits. Les travaux futurs

sur la conservation dans ce domaine bénéficieront des avancées effectuées en microbiologie prévisionnelle, en analyse quantitative des risques et en modélisation cinétique des réactions. Ces modèles font encore l'objet de recherches, et leur utilisation est pour le moment cantonnée aux laboratoires, aux centres techniques ou aux services de recherche et développement de très grands groupes industriels. Il est important qu'ils puissent rapidement être intégrés à des systèmes d'aide à la décision utilisables par des acteurs de taille plus réduite, qui constituent la majeure partie des entreprises agroalimentaires françaises. Dans tous les cas, leur « démocratisation » nécessitera un minimum de compréhension et d'interprétation des phénomènes concernés, ce à quoi espère contribuer cet ouvrage.



Conclusion

Les procédés de conservation restent indispensables pour assurer la sécurité alimentaire et sanitaire des consommateurs. Ils apportent de nombreux bénéfices, en assurant une alimentation diversifiée tout au long de l'année et en préservant, voire en rendant plus biodisponibles, de nombreux nutriments. Ils modulent et reflètent notre culture alimentaire, qui s'est construite à partir des terroirs et de méthodes traditionnelles de conservation, dont les principes sont souvent à l'origine des procédés actuels. Ils sont toutefois remis en question en ce qui concerne la durabilité des procédés et la naturalité des aliments transformés. Cette remise en cause croissante est contemporaine d'une forte augmentation des connaissances scientifiques dans le domaine, ainsi que du développement de nouveaux outils qui permettent aux chercheurs de mieux comprendre et analyser les aliments, les populations microbiennes, et d'exploiter plus efficacement les données à l'aide de la modélisation et de l'intelligence artificielle.

Ces progrès scientifiques et ces nouveaux outils constituent une base solide pour améliorer la durabilité des procédés de conservation et des emballages ou développer de nouveaux aliments fermentés. Les futures usines de transformation des aliments et les nouvelles chaînes de distribution pourront être économes en énergie (notamment en énergie fossile) et en eau. Elles s'appuieront sur des procédés thermiques mieux contrôlés et plus performants, combinés aux traitements non thermiques qui émergent actuellement et à l'utilisation de nouveaux emballages moins impactants sur l'environnement. Mais l'amélioration de la durabilité des procédés de conservation ne doit pas reposer uniquement sur le concept d'usine du futur, sur une meilleure maîtrise de la chaîne du froid ou sur de nouveaux emballages. Une réflexion plus large doit être menée, qui tienne compte de la réalité de la production et de la transformation des produits agricoles, ainsi que de son évolution aux différentes échelles territoriales. Étant donné que la grande majorité des entreprises

agroalimentaires françaises sont de taille modeste et reposent sur le savoir-faire et l'expertise des opérateurs, les chercheurs doivent contribuer à développer des systèmes d'aide à la décision fiables et simples, qui permettent d'apprécier la durabilité du système et d'intégrer les connaissances expertes de ces artisans et opérateurs, afin de leur permettre de choisir les meilleurs procédés, les meilleures conditions de conservation et d'emballage, ainsi que les meilleurs circuits de distribution ou de réemploi.

La recherche tente également de répondre aux questions que se posent les consommateurs sur le manque de naturalité des aliments et leur trop forte transformation. Elle contribue à enrichir et à objectiver le débat autour des notions de « naturalité » et d'« ultratransformation », leurs enjeux, et à montrer la complexité des travaux à entreprendre pour y répondre. Il est ainsi important de bien comprendre les effets multiples de certains conservateurs ou additifs et la difficulté à les remplacer sans remettre en cause la sécurité sanitaire des produits alimentaires concernés. De la même façon, la notion d'« ultratransformation » doit être mieux définie, plusieurs mécanismes pouvant être invoqués pour expliquer les résultats des études épidémiologiques sur la nocivité des aliments ultratransformés. Ces mécanismes, qui pourraient agir en synergie, demandent à être validés toxicologiquement, afin de quantifier les risques réels encourus par les populations et la manière d'y faire face. Cela est d'autant plus crucial que des études plus précises montrent que ce ne sont ni tous les types d'aliments dits « ultratransformés » ni l'intensité des procédés en eux-mêmes qui expliquent les corrélations observées (Cordova *et al.*, 2023 ; Lasschuijt *et al.*, 2025).

Au-delà des réponses apportées aux préoccupations des consommateurs-citoyens, les résultats de la recherche et les systèmes d'aide à la décision développés pourront soutenir les politiques publiques dans leurs stratégies de développement, tant nationales que territoriales, visant à créer de nouvelles filières plus durables garantissant des aliments conservés de manière saine. Les questions liées à la durabilité et à la naturalité restent des défis majeurs pour les chercheurs des différentes disciplines — génie des procédés, biochimie, microbiologie, toxicologie, nutrition et sociologie de l'alimentation —, qui devront unir

leurs efforts pour parvenir aux résultats escomptés. Les auteurs espèrent qu'outre une meilleure compréhension de ces questions par le public, cet ouvrage aura permis aux étudiants d'avoir une vision plus large de leurs enseignements et suscitera ainsi de futures vocations de chercheurs, motivés pour y répondre de manière pluridisciplinaire.

Tableau 3. Genres ou espèces de micro-organismes rencontrés de manière dominante dans les différents types d'aliments fermentés en fonction de leur origine.

Types d'aliments	Origine	Genres ou espèces de micro-organismes (dominants)
Produits laitiers		
Yaourts	Europe de l'est	Bactéries lactiques <i>Lb. delbrückii</i> subsp. <i>Bulgaricus</i> , <i>Str. thermophilus</i>
<i>Koumiss</i> , <i>airag</i> (lait de jument, de chamelle)	Asie centrale	
Beurre	Monde	Bactéries lactiques <i>Lc. lactis</i> , <i>Lc. lactis biovar diacetylactis</i> , <i>Leuconostoc lactis</i>
Fromages à pâte molle	Monde	Bactéries lactiques <i>Lc. lactis</i> , <i>Str. thermophilus</i> Bactéries à Gram négatif <i>Psychrobacter celer</i> , <i>Hafnia alvei</i> Moisissures <i>Penicillium camemberti</i>
Bleus	Europe	Bactéries lactiques <i>Lc. lactis</i> , <i>Leuconostoc mesenteroides</i> Moisissures <i>Penicillium roquefortii</i>
Fromages à pâte pressée cuite	Europe, Amériques	Bactéries lactiques <i>Str. thermophilus</i> , <i>Lb. helveticus</i> Bactéries propioniques <i>Propionibacterium freudenreichii</i>

Types d'aliments		Origine	Genres ou espèces de micro-organismes (dominants)
Produits carnés			
	Salaisons sèches (saucisson, saucisse sèche)	Europe, Amériques	Bactéries lactiques <i>Latilactobacillus sakei</i> subsp. <i>carneus</i> , <i>Sta. xylosus</i> , <i>Sta. carnosus</i>
Produits de la mer			
	<i>Rakfisk</i> , <i>surströmming</i> (poisson fermenté)	Europe du nord	Bactéries lactiques <i>T. sp.</i> , <i>Lentilactobacillus sp.</i> , <i>Carnobacterium sp.</i> , <i>Vagococcus sp.</i>
	<i>Jeotgal</i> (condiment, poissons, produits de la mer fermentés)	Corée	Bactéries lactiques <i>Lb. sp.</i> , <i>Weissella sp.</i> Archées <i>Halobacteriaceae</i>
	<i>Nuoc-mâm</i> (condiment, poisson fermenté)	Vietnam (Asie du sud-est)	<i>T. sp.</i>
	<i>Garum</i> (condiment, viscères de poisson)	Grèce et Rome antiques	inconnu
Produits végétaux			
Légumes fermentés	<i>Kimchi</i> (chou fermenté)	Corée	Bactéries lactiques <i>Lb. sp.</i> , <i>Pediococcus sp.</i> , <i>Leuconostoc sp.</i> , <i>Weissella sp.</i> , <i>T. sp.</i> , <i>Lc. sp.</i>
	Choucroute (chou fermenté)	Europe	
	<i>Sinkhi</i> (radis fermentés)	Inde, Népal et pays de la région	Bactéries lactiques <i>Lb. sp.</i> , <i>Pediococcus sp.</i> , <i>Leuconostoc sp.</i> , <i>Weissella sp.</i> , <i>T. sp.</i> , <i>Lc. sp.</i>
	<i>Goyang</i> , <i>inzhangsang</i> , <i>gundruk</i> (feuilles de légumes verts fermentés)	Inde, Népal et pays de la région	Bactéries lactiques <i>Lb. sp.</i> , <i>Pediococcus sp.</i> , <i>Leuconostoc sp.</i> , <i>Weissella sp.</i> , <i>T. sp.</i> , <i>Lc. sp.</i>
	<i>Khalpi</i> (pickle de concombre)	Inde, Népal et pays de la région	Bactéries lactiques <i>Lb. sp.</i> , <i>Pediococcus sp.</i> , <i>Leuconostoc sp.</i> , <i>Weissella sp.</i> , <i>T. sp.</i> , <i>Lc. sp.</i>

Types d'aliments		Origine	Genres ou espèces de micro-organismes (dominants)
Soja fermenté	Natto	Japon	<i>B. subtilis subsp. natto</i>
	Chungkukjang Kinema Aakhune, bekaeng Hawaijar, eruyaang, tungymbai	Corée Région himalayenne Inde, Népal, Bhoutan Inde	Bactéries du groupe subtilis (fermentation alcaline) <i>B. sp. (Bacillus subtilis)</i>
	Thua nao Pepok Sieng	Thaïlande Myanmar Cambodge, Laos	Bactéries lactiques (fermentation lactique)
	Miso, shoyu Tempeh Douchi, sufu Doenjang	Japon Indonésie Chine Corée	Moisissures filamenteuses <i>Aspergillus sp.</i> , <i>Mucor sp.</i> , <i>Rhizopus sp.</i>
	Bikalga (graines d'hibiscus)	Afrique (Burkina faso)	Fermentation alcaline <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. cereus</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. badius</i> , <i>B. bor-telensis</i> , <i>B. sphaericus</i> , <i>B. fusiformis</i> , <i>Sta. spp.</i>
Autres légumineuses	Dawadawa (caroube), iru (féverole)	Afrique (Nigeria, Bénin)	<i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. circulans</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. metaterium</i> <i>Sta. saprophyticus</i> , <i>Sta. epidermidis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	Dhokla, papad, wari, maseura (haricots urd)	Inde, Népal	Bactéries lactiques Levures <i>Candida krusei</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i>

Types d'aliments		Origine	Genres ou espèces de micro-organismes (dominants)
Céréales fermentées	Pain	Monde	Levures <i>Saccharomyces cerevisiae</i> Bactéries lactiques <i>Fructilactobacillus sanfranciscensis</i> , <i>Companilactobacillus paralimentarius</i> , <i>Lb. spicheri</i> , <i>Lactiplantibacillus plantarum</i>
	Ragi (riz), Murcha (riz) Loog-pang (riz) Tane Kojji (riz) Nan, kulcha, bhatura (blé)	Indonésie Inde, Népal Thaïlande Japon Inde, Pakistan, Afghanistan, Iran	Bactéries lactiques <i>Enterococcus sp.</i> , <i>Lc. sp.</i> , <i>Lb. sp.</i> , <i>Leuconostoc sp.</i> , <i>Pediococcus sp.</i> , <i>Str. sp.</i> , <i>Weissella sp.</i> Levures <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Saccharomycopsis fibuligera</i> , <i>Pichia anomala</i> , <i>Aspergillus oryzae</i> , <i>Aspergillus usarii</i> (dominant) <i>Candida sp.</i> , <i>Debaryomyces sp.</i> , <i>Hansenula sp.</i> , <i>Kazachstania sp.</i> , <i>Pichia sp.</i> , <i>Trichosporon sp.</i> , <i>Yarrowia sp.</i> (espèces mineures)
	Tape ketan (riz fermenté)	Indonésie	Levures <i>Amylomyces rouxii</i> , <i>Candida pelliculosa</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> . Bactéries <i>B. sp.</i>
Racines et tubercules	Manioc Gari Fufu, agbelima Chikwangue Kivunde Kocho Foo foo	Nigeria Togo, Burkina Faso, Bénin, Nigeria, Ghana Zaire Tanzanie Ethiopie Nigeria, Bénin, Togo, Ghana	Bactéries lactiques <i>Lb. acidophilus</i> , <i>Lb. casei</i> , <i>Limosilactobacillus fermentum</i> , <i>Lactiplantibacillus pentosus</i> , <i>Lb. plantarum</i> , <i>Corynebacterium Manihot</i>

Types d'aliments		Origine	Genres ou espèces de micro-organismes (dominants)
Autres végétaux fermentés (fruits et graines d'arbres)	Olives	Europe, Méditerranée	Levures <i>Wickerhamomyces anomalus</i> , <i>Pichia membranifaciens</i> , <i>Citeromyces nyonsensis</i> , <i>Candida boidinii</i> , <i>Candida atlantica</i> , <i>Zygosaccharomyces mrakii</i> Bactéries marines (apportées par le sel de la saumure) <i>Alcanivorax</i> sp., <i>Salinicola</i> sp., <i>Marinobacter</i> sp., <i>Halomonas</i> sp., <i>Methylophaga</i> sp.
	<i>Bikalga</i> (graines d'hibiscus)	Burkina Faso	Fermentation alcaline <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. cereus</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. badius</i> , <i>Brevibacillus borelensis</i> , <i>B. sphaericus</i> , <i>B. fusiformis</i> and <i>Sta. spp</i>
	<i>Soumbala</i> (graines de néré)	Burkina Faso	Fermentation alcaline <i>B. subtilis</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. cereus</i> , <i>B. sphaericus</i> , <i>Brevibacillus borelensis</i> , <i>B. thuringiensis</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. badius</i> , <i>Paenibacillus alvei</i> , <i>B. firmus</i> , <i>Paenibacillus larvae</i> , <i>Brevibacillus laterosporus</i> , <i>B. megaterium</i> , <i>B. mycoides</i>
	<i>Okpehe</i> (graines de <i>Prosopis africana</i>)	Nigeria	Fermentation alcaline <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. megaterium</i> , <i>B. cereus</i> , <i>Sta. epidermidis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Lb. spp.</i> , <i>Proteus spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Enterococcus spp.</i> , <i>Sta. spp.</i> , <i>Micrococcus spp.</i>
	<i>Ugba</i> (graine de Mbala, <i>Pentaclethra macrophylla</i>)	Nigeria	Fermentation alcaline <i>B. subtilis</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. brevis</i> , <i>B. megaterium</i> , <i>B. polymyxa</i> , <i>B. coagulans</i> , <i>B. macerans</i> , <i>B. cereus</i> , <i>Lb. spp.</i> , <i>Micrococcus spp.</i> , <i>Pseudomonas chlororaphis</i> , <i>Micrococcus roseus</i> , <i>Sta. saprophyticus</i> , <i>Sta. spp.</i>

Abréviations : *B.* : *Bacillus* ; *Sta.* : *Staphylococcus* ; *Str.* : *Streptococcus* ; *Lb.* : *Lactobacillus* ; *Lc.* : *Lactococcus* ; *T.* : *Tetragenococcus*



Glossaire

Acide aminé : molécule comportant à la fois une fonction acide et une fonction amine. Dans le cadre de cet ouvrage, il s'agit spécifiquement des vingt acides aminés composant les protéines.

Alkyle : se dit d'un enchaînement d'atomes de carbone uniquement substitués par des atomes d'hydrogène. Les acides gras, constituants principaux des lipides, sont composés d'un acide carboxylique portant une chaîne alkyle de longueur et degré d'insaturation variable.

Amine biogène : molécule issue de la décarbonylation (élimination d'une fonction acide COOH) des **acides aminés**. Elle est dite « biogène » car elle est générée par les **enzymes** des micro-organismes contaminants. Certaines sont potentiellement toxiques.

Appertisation : méthode de stabilisation par la chaleur (généralement, stérilisation) appliquée à des aliments contenus dans des emballages hermétiquement scellés.

Autoclave : récipient à parois épaisses et fermeture hermétique conçu pour chauffer sous pression, ce qui permet d'atteindre des températures supérieures à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et de **stériliser** les aliments.

Bactériocine : molécule produite par une bactérie qui a la propriété d'inhiber la croissance d'autres espèces bactériennes. Chimiquement, les bactériocines sont des peptides (enchaînements de quelques dizaines d'**acides aminés**).

Cellulose : polymère constitué de nombreuses molécules de glucose reliées entre elles par des liaisons particulières ($\beta 1-4$). Ces chaînes s'associent pour former des structures rigides appelées microfibrilles, qui donnent leur solidité au bois, au papier ou au carton.

Champs électriques pulsés : technologie consistant à soumettre l'aliment (liquide) à des impulsions électriques de très courte durée (de l'ordre de la microseconde), ce qui provoque une ouverture de pores dans les membranes cellulaires ; selon l'intensité, ils

permettent de faciliter l'extraction des jus (quelques kV), notamment de betterave sucrière, ou d'éliminer les micro-organismes (10-80 kV), auquel cas ils nécessitent un emballage aseptique.

Chauffage ohmique : technologie de chauffage basée sur l'effet Joule, c'est-à-dire l'augmentation de chaleur due à la résistance de l'aliment soumis à un courant électrique. Particulièrement efficace d'un point de vue énergétique, il est appliqué dans des systèmes continus, est limité aux aliments pompables et nécessite un emballage aseptique.

Chélation : propriété de certaines molécules, appelées « ligands » ou « chélateurs », de fixer par au moins deux liaisons un ion métallique dit « chélaté », retenu de façon plus forte que par une simple liaison ionique.

Chromatogénie : technologie visant à créer une **fonctionnalité barrière** à l'eau en surface de papier par fixation de petites molécules lipidiques biosourcées.

Coalescence : phénomène physique qui désigne la fusion entre gouttelettes en contact.

Édulcorant massique : substance porteuse d'un goût sucré. On différencie les édulcorants intenses, dont le pouvoir sucrant est plusieurs dizaines de fois supérieur à celui du sucre (saccharine, stévia, aspartame), des édulcorants massiques, dont le pouvoir sucrant est inférieur à celui du sucre et qui sont utilisés pour leurs propriétés de rétention d'eau (sorbitol, xylitol).

Endogène : présente dans la matière première animale ou végétale avant toute intervention.

Enzymes, enzymatique : protéines qui agissent comme catalyseur des réactions chimiques. Omniprésentes dans les produits animaux et végétaux ou ajoutées pour des buts technologiques, elles catalysent ces réactions dans des conditions douces (entre 20 et 40 °C).

Film protéique : phénomène physique désignant l'accumulation de protéines à l'interface air-liquide qui conduit à la formation d'un film continu.

Flash-pasteurisation : opération technologique consistant à chauffer ($> 75^{\circ}\text{C}$) rapidement et pour des temps courts (moins d'une minute) des solutions acides pour éliminer les micro-organismes non sporulés, suivie d'un refroidissement rapide. Elle est réalisée sur un échangeur de chaleur et suivie d'un conditionnement aseptique.

Fonctionnalité barrière, fonctionnalisation barrière : la fonctionnalité barrière désigne la capacité d'un matériau à empêcher ou limiter la diffusion d'un gaz. Cette propriété peut être conférée à un matériau non-barrière par une intervention technologique dite « de fonctionnalisation ». La couche barrière peut être organique ou inorganique (à base de matériaux inorganiques).

Forme végétative : se dit d'une bactérie dont les cellules sont en croissance et division actives, contrairement aux spores dormantes et résistantes. Les formes végétatives sont actives métaboliquement et dépourvues d'enveloppe ou de composition protectrice, elles sont donc sensibles aux méthodes physiques de contrôle.

Gram négatif, gram positif : méthode qui permet de distinguer les bactéries reposant sur une technique de coloration appelée coloration de Gram. Elle différencie les bactéries selon la composition de leurs membranes et parois, les bactéries à gram négatif ayant une membrane plus complexe ne permettant pas la même pénétration du colorant, notamment par la présence de lipopolysaccharide.

Halotolérant : un organisme halotolérant est capable de s'adapter à de fortes variations de la teneur en sel, notamment des concentrations salines supérieures à celles requises pour sa croissance. Contrairement aux organismes halophiles, il ne requiert pas ce type de concentration pour survivre et se développer.

Hydrocolloïde : macromolécule hydrosoluble qui, dissoute en faible teneur dans une solution aqueuse, entraîne une forte augmentation de sa viscosité ou la formation de gels.

Hydrophobant : traitement rendant un matériau initialement hydrophile (attirant l'eau) hydrophobe (repoussant l'eau).

Hypercalcémie : trouble correspondant à un excès de calcium dans le sang.

Hyperkaliémie : trouble correspondant à un excès de potassium dans le sang.

Irradiation : opération consistant à exposer des aliments à des rayonnements. Ce terme désigne plus spécifiquement l'utilisation de rayonnements ionisants qui éliminent certains micro-organismes et les insectes. Elle peut permettre une véritable **stérilisation** sans cuisson et est utilisée dans les aliments pour les astronautes.

Lignocellulosique : matériau constitué essentiellement de lignine et de **cellulose**, par exemple le bois ou la paille. La lignine est un polymère phénolique qui donne au bois des propriétés de résistance aux agressions par les micro-organismes ou les conditions du milieu.

Macromolécule, macromoléculaire : molécule polymère, typiquement présentant des masses molaires de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de daltons.

Matrice alimentaire : concept qui désigne un aliment ou une matière première destinée à devenir un aliment dans sa complexité physico-chimique.

Métabolite : petite molécule ou monomère produit par le métabolisme des êtres vivants : acide citrique, glucose, glutamine...

Microbiote : ensemble des micro-organismes — bactéries, virus, parasites et champignons non pathogènes, dits « commensaux » — qui vivent dans un environnement spécifique.

Mycotoxine : composés toxiques produits naturellement par certains types de moisissures (champignons), notamment dans les grains et graines stockés ou les fruits et légumes. Peu labiles, elles sont souvent résistantes aux traitements technologiques et actives à faible dose.

Organoleptique : adjectif désignant ce qui est perçu par les sens. Les propriétés organoleptiques incluent le goût, l'odorat, la couleur, la texture.

Oxydase : classe d'**enzymes** responsables de la catalyse de réactions d'oxydoréduction (transfert d'électrons) impliquant une molécule d' O_2 comme accepteur d'électron ($l'O_2$ est alors réduit

en eau ou en peroxyde d'hydrogène, tandis que l'autre molécule est oxydée). Il existe de nombreuses classes en fonction de leur substrat : lipoxygénases, polyphénoloxylase, etc.

Ozonation : opération technologique consistant à traiter un aliment ou une surface par de l'ozone (ou trioxygène — O_3) afin d'éliminer les micro-organismes.

Pascalisation : opération technologique consistant à soumettre, dans des enceintes fermées, l'aliment emballé à des pressions de l'ordre de 5 000 bar pour quelques minutes afin d'éliminer les formes végétatives des micro-organismes. Elle est donc l'équivalent d'une **pasteurisation**, mais avec moins de phénomène de cuisson.

Pasteurisation : procédé permettant de détruire les formes végétatives des bactéries et champignons, mais laissant persister les spores. Le plus souvent, ce procédé utilise un traitement thermique (70 °C à 100 °C).

Perméat : lors d'une opération de filtration (par exemple, micro-filtration), le perméat désigne la partie du liquide qui traverse les pores de la membrane. Il est séparé du rétentat, fraction des molécules retenues par la membrane car trop volumineuses.

Plasma : les plasmas sont le quatrième état de la matière. Ce sont des gaz ionisés contenant ions, électrons libres, mais aussi des molécules neutres. Des plasmas dits « froids » sont utilisés pour créer des réactions chimiques à la surface des matériaux.

Phytolithe : concrétion siliceuse formée dans les plantes, qui est caractéristique d'un végétal et peut persister dans les restes archéologiques.

Polyphénol, aussi désigné par composé phénolique : classe de **métabolites** secondaires végétaux caractérisée par la présence d'un ou plusieurs cycles benzéniques portant une ou plusieurs fonctions hydroxyles ($-OH$). Ces composés possèdent des propriétés antioxydantes, peuvent être colorés (par exemple, les anthocyanes sont des composés phénoliques) et sont les substrats du brunissement **enzymatique**.

Propioniques : les bactéries propioniques appartiennent au genre propionibactérium et sont des bactéries non pathogènes, non sporulées et anaérobies facultatives, qui ont une température de croissance comprise entre 15 °C et 40 °C. Elles sont notamment impliquées dans la fabrication de fromages à pâte pressée cuite.

Protéolyse/protéolytique : ensemble de réactions biologiques conduisant à la dégradation des protéines.

Psychoactif : molécule perturbant le fonctionnement du système nerveux central, par exemple excitant, tranquillisant, somnifère, hallucinogène.

Psychotrophe : bactérie dont le développement est optimal à des températures variant de 20 à 30 °C mais qui peut vivre et se développer à 0 °C.

Pulvérulent : sous forme de poudre ou d'aspect poudreux.

Rétrogradation : appliqué spécifiquement à l'amidon, ce terme désigne la reformation des formes cristallines après sa gélatinisation.

Salpêtre : nitrate de potassium (KNO_3), se trouve sous forme **pulvérulente** blanche sur les vieux murs humides et existe aussi sous forme de minéral mélangé à du sel.

Séchage par atomisation : opération technologique qui consiste à sécher les molécules dissoutes en pulvérisant finement la solution dans un courant d'air chaud et sec.

Sénescence : stade suivant la **surmaturation**, dans lequel, même en l'absence de contamination microbiologique, le produit végétal devient impropre à la consommation (liquéfaction, brunissement).

Stérilisation : procédé permettant de détruire tous les bactéries et champignons, qu'ils soient sous forme végétative (métaboliquement active) ou sous forme de spore. Le plus souvent, ce procédé utilise des traitements thermiques à haute température (100 à 180 °C).

Surmaturation : se dit d'un fruit ou légume qui a passé le stade de maturité optimale, mais reste consommable (voir : **sénescence**).

Thermostable : résistant aux traitements thermiques (typiquement pour une **enzyme** gardant une activité jusqu'à 70-90 °C).

Ultrasonication : opération technologique qui consiste à utiliser les ultrasons pour agiter les particules d'une solution, permettant d'en réduire la taille et ainsi de stabiliser les émulsions. Les ultrasons peuvent aussi provoquer dans les liquides des phénomènes de cavitation importants qui sont utilisés pour inactiver les populations microbiennes.



Bibliographie

Abel N., Rotabakk B. T., Lerfall J., 2021. Mild processing of seafood: *A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, 1, 340-370, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12876>

Ahn J., Lee H.-Y., Balasubramaniam V. M., 2015. Inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* spores in low-acid foods by pressure-assisted thermal processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 1, 174-178, <https://doi.org/10.1002/jsfa.6700>

Anses, 2024. Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la caractérisation et évaluation des impacts sur la santé de la consommation d'aliments dits ultratransformés, Maisons-Alfort, 104 p., <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2022-SA-0155.pdf>

Caron P., Châtaignier J.-M., 2017. *Un défi pour la planète: les objectifs de développement durable en débat*, Marseille, IRD Éditions et Quæ, 480 p.

Chiffolleau Y., Dourian T., 2020. Sustainable Food Supply Chains: Is Shortening the Answer? A Literature Review for a Research and Innovation Agenda. *Sustainability*, 12, 23, 9831, <https://doi.org/10.3390/su12239831>

Cordova R., Viallon V., Fontvieille E., Peruchet-Noray L., Jansana A., Wagner K.-H., Kyrø C., Tjønneland A., Katzke V., Bajracharya R., Schulze M. B., Masala G., Sieri S., Panico S., Ricceri F., Tumino R., Boer J. M. A., Verschuren W. M. M., van der Schouw Y. T., Jakšzyn P., Redondo-Sánchez D., Amiano P., Huerta J. M., Guevara M., Borné Y., Sonestedt E., Tsilidis K. K., Millett C., Heath A. K., Aglago E. K., Aune D., Gunter M. J., Ferrari P., Huybrechts I., Freisling H., 2023. Consumption of ultra-processed foods and risk of multimorbidity of cancer and cardiometabolic diseases: a multinational cohort study. *The Lancet Regional Health — Europe*, 14, 35, 100771, <https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2023.100771>

Cortesi A., Colpaert M., Saint-Eve A., Maurice B., Yannou-Le Bris G., Souchon I., Pénicaud C., 2023. Data on the Life Cycle Assessment of pizzas cooked and consumed at home taking into account the variability of consumer practices. *Data in Brief*, 48, 109143, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109143>

Denoux P., 2014. *Pourquoi cette peur au ventre? Cultures et comportements face aux crises alimentaires*, Paris, éditions JC Lattès, 244 p.

Duret S., 2014. Modélisation de la variabilité des transferts thermiques dans la chaîne du froid pour la maîtrise de la qualité et la sécurité des aliments, thèse de doctorat, Sciences de l'environnement, spécialité Génie des procédés, Institut des Sciences et des Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), <https://hal.inrae.fr/FRISE/tel-02600249v1>

Duret S., Hoang H.-M., Guillier L., Derens-Bertheau E., Dargaignaratz C., Oriol S., Delahaye A., Laguerre O., Nguyen-the C., 2021. Interactions between



refrigeration temperatures, energy consumption in a food plant and microbiological quality of the food product: Application to refrigerated stuffed pasta. *Food Control*, 126, 108076, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108076>

EFSA, ECDPC, 2024. The European Union One Health 2023 Zoonoses report. *EFSA Journal*, 22, 12, e9106, <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.9106>

Galanakis C. M., 2023. *The age of clean label foods*. Heidelberg, éditions Springer Nature, 268 p.

Income Consulting — AK2C, 2016. Pertes et gaspillages alimentaires: l'état des lieux et leur gestion par étapes de la chaîne alimentaire, rapport, 164 p., <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26873-pertes-gaspillage-alim-ademe.pdf>

International Agency for Research on Cancer, 2018. *Red Meat and Processed Meat*, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 114, World Health Organization, <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Red-Meat-And-Processed-Meat-2018>

IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (eds)], Cambridge (UK) and New York (USA), Cambridge University Press, 3056 p., <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Kondjoyan A., Guillard V., Mirade P.-S., Goli T., Collignan A., Arnaud E., Costa S., Gontard N., Zakhia-Rozis N., 2024. Réduire les pertes et le gaspillage alimentaires dans les chaînes d'approvisionnement en viandes et en fruits: que peut apporter le génie des procédés alimentaires?, in Thomas A., Alpha A., Barcsak A., Zakhia-Rozis N. (coord.), 2024. *Durabilité des systèmes pour la sécurité alimentaire. Combiner les approches locales et globales*, Versailles, éditions Quæ, 246 p. (coll. Synthèses).

Kothe C., 2021. Diversité des bactéries halophiles dans l'écosystème fromager et étude de leurs impacts fonctionnels, thèse de doctorat, spécialité Biochimie, Biologie moléculaire, Université Paris-Saclay, <https://pastel.hal.science/tel-03223093v1>

Lasschuijt M. P., Heuven L. A., Gonzalez-Estanol K., Siebelink E., Chen Y., Gorde C. G., 2025. The Effect of Energy Density and Eating Rate on Ad Libitum Energy Intake in Healthy Adults — A Randomized Controlled Study. *The Journal of Nutrition*, <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2025.06.006>

Matar C., Gaucel S., Gontard N., Guilbert S., Guillard V., 2018. Predicting shelf life gain of fresh strawberries 'Charlotte cv' in modified atmosphere packaging. *Postharvest Biology and Technology*, 142, 28-38, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.03.002>

Matar C., Guillard V., Gauche K., Costa S., Gontard N., Guilbert S., Barcsak S., 2020. Consumer behaviour in the prediction of postharvest losses

reduction for fresh strawberries packed in modified atmosphere packaging. *Postharvest Biology and Technology*, 163, 111119, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111119>

Mazzetto A. M., Falconer S., Ledgard S., 2023. Carbon footprint of New Zealand beef and sheep meat exported to different markets. *Environmental Impact Assessment Review*, 98, 106946, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106946>

Membré J.-M., 2013. *Évaluation des risques microbiologiques*, Londres, éditions ISTE, 256 p.

Minimeau, 2016-2020. Minimisation des consommations d'eau dans les industries agroalimentaires par le développement d'une approche intégrée associant Pinch massique et empreinte eau. Projet ANR, associant des Centres Techniques, INRAE et Ademe, <https://minimeau.fr>

Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, Sédillot B. (directrice de publication), Abadia F. (rédactrice en chef), 2024. Les déchets alimentaires en France et dans l'Union européenne en 2021, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/7316/download?inline>

Pierre F. H. F., 2019. Association positive entre la consommation de viandes rouges, de charcuteries et le risque de cancer du côlon : vers une prévention par modification des modes de production et d'élevage?. *Innovations Agronomiques*, 78, 117-125, <https://dx.doi.org/10.15454/8rkb-a908>

Saadé M., Jolliet O., 2024. *Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, éditions EPFL, 360 p.

Sym'Previus : Outil de prévision des données microbiologiques visant à garantir la sécurité et la qualité des aliments, <https://symprevius.eu/fr/>

Thomas A., Alpha A., Barcsak A., Zakhia-Rozis N. (coord.), 2024. *Durabilité des systèmes pour la sécurité alimentaire. Combiner les approches locales et globales*, Versailles, éditions Quæ, 246 p. (coll. Synthèses).

Viana L. R., Marty C., Boucher J.-F., Dessureault P.-L., 2023. Here's how your cup of coffee contributes to climate change. *The conversation*, <https://theconversation.com/heres-how-your-cup-of-coffee-contributes-to-climate-change-196648>

Zagorec M., Christeans S., 2013. *Flores protectrices pour la conservation des aliments*, Versailles, éditions Quæ, 160 p.



Liste des auteurs

Alain Kondjoyan est chercheur en génie des procédés alimentaires et en modélisation à INRAE (unité QuaPA, Saint-Genes-Champanelle). Ses travaux visent à mieux comprendre et à prédire l'effet de la transformation des produits carnés sur leur qualité et leur durée de conservation.

Cheffe de département adjointe du département Transform d'INRAE (Nantes), **Catherine Renard** a étudié l'impact de la transformation des fruits et légumes sur leurs qualités, en particulier celles médiées par les microconstituants végétaux (antioxydants, vitamines, etc.).

Directeur de la recherche au CTCPA (Bourg-en-Bresse), **Patrice Dole** a animé pendant 10 ans le pôle « Emballage » du Centre, au technopole Alimentec de Bourg-en-Bresse.

Laurence Fournaison et **Hong Minh Hoang-Le** sont chercheuses à INRAE (unité Frise, Antony). Leurs travaux portent respectivement sur les économies d'énergie pour la production du froid durable en agroalimentaire et sur les méthodes d'optimisation pour la gestion et le dimensionnement des systèmes frigorifiques, en particulier le stockage de l'énergie thermique.

Chercheur INRAE, **Yves Le Loir** dirige l'UMR STLO (Rennes). Ses travaux portent sur la microbiologie alimentaire et vétérinaire en lien avec la filière laitière, et notamment sur le rôle de *Staphylococcus aureus* dans cette filière, sur son adaptation à l'hôte ruminant et ses interactions avec les bactéries lactiques.

Caroline Pénicaud est chercheuse à INRAE (unité SayFood, Paris-Saclay). Ses travaux portent sur l'évaluation de l'impact environnemental des produits alimentaires, notamment au travers de l'intégration de l'analyse du cycle de vie (ACV) dans les processus de conception et de transformation des aliments.

Monique Zagorec, anciennement affiliée à l'UMR Secalim d'INRAE-Oniris (Nantes), a consacré sa carrière à l'adaptation de *Lactilactobacillus sakei* aux viandes, et est maintenant chargée de mission retraitée pour le département Mica d'INRAE.

François Zuber coordonne au CTCPA (Avignon) les programmes de recherche collective pour les industriels et est chargé de la capitalisation et du transfert des savoirs. Sa spécialité porte sur le traitement thermique et athermique de préservation des aliments, dont l'optimisation des barèmes de stérilisation.

Visuel de couverture : photographie de Aude Boufflet,
pictogrammes de © yasindu/Adobe Stock
et © Cetacons/Adobe Stock

Coordination éditoriale : Aude Boufflet

Édition : François-Xavier Mas

Mise en pages et couverture : mapicha.fr

Achevé d'imprimer

Les produits d'origine végétale ou animale évoluent sous l'action de réactions biochimiques et microbiennes. Afin de limiter leur détérioration, des méthodes de conservation ont été mises au point dès la Préhistoire, et leurs principes sont encore aujourd'hui à la base des techniques utilisées dans l'industrie agroalimentaire.

Ces procédés sont indispensables, mais une partie des consommateurs occidentaux les remettent en question pour diverses raisons : durabilité des procédés, naturalité des moyens de conservation et impacts sur notre santé.

Basé sur les connaissances actuelles dans le domaine des sciences de l'aliment, cet ouvrage nous permet d'appréhender les apports des procédés de conservation à une alimentation saine, durable et disponible. Il présente leurs modes d'action, les questions qu'ils soulèvent et les réponses apportées par la recherche.

L'utilisation du froid ou de la chaleur, la fermentation ou la biopréservation, le rôle et la durabilité des emballages, la formulation des aliments et les analyses de cycle de vie sont autant de thèmes abordés à travers le prisme des moyens agroalimentaires actuels. Les auteurs mettent également en avant des procédés plus récents et explorent l'idée de combiner différentes méthodes pour faire face aux défis alimentaires de demain.

Cet ouvrage s'inscrit dans une large réflexion sur l'évolution de notre alimentation. Il s'adresse à tous ceux — consommateurs, enseignants, étudiants, décideurs — qui veulent mieux comprendre comment les choix technologiques d'aujourd'hui peuvent influencer le futur de notre alimentation et donc celui de notre santé et de notre environnement.

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

INRAE

17 €

ISBN : 978-2-7592-4077-7



9 782759 240777

ISSN : 2267-3032

Réf. : 03013