

La conservation des aliments

Définition, importance et méthodes

NORMAN WILFRED DESROSIER

Ancien directeur de recherche, National Biscuit Company, New York City. Auteur de « The Technology of Food Preservation ».

R. PAUL SINGH

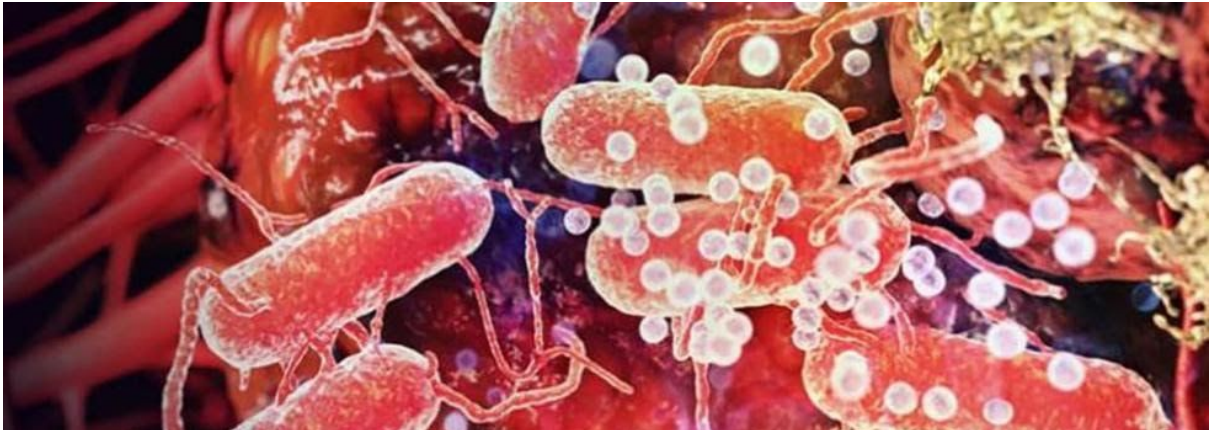
Professeur de génie alimentaire, Université de Californie, Davis. Coauteur de « Introduction à l'ingénierie alimentaire ».

La conservation des aliments, l'une ou l'autre des méthodes permettant d'empêcher la détérioration des aliments après la récolte ou l'abattage. De telles pratiques datent de la préhistoire. Parmi les plus anciennes méthodes de conservation, on trouve le séchage, la réfrigération et la fermentation. Les méthodes modernes comprennent la mise en conserve, la pasteurisation, la congélation, l'irradiation et l'ajout de produits chimiques. Les progrès des matériaux d'emballage ont joué un rôle important dans la conservation des aliments modernes.

Mécanismes de détérioration

La détérioration des aliments peut être définie comme tout changement qui rend les aliments impropres à la consommation humaine. Ces changements peuvent être causés par divers facteurs, y compris la contamination par des micro-organismes, l'infestation par des insectes ou la dégradation par des enzymes endogènes (celles présentes naturellement dans l'aliment). De plus, des changements physiques et chimiques, comme le déchirement de tissus végétaux ou animaux ou l'oxydation de certains constituants des aliments, peuvent favoriser la détérioration des aliments. Les aliments d'origine végétale ou animale commencent à se détériorer peu après la récolte ou l'abattage. Les enzymes contenues dans les cellules des tissus végétaux et animaux peuvent être libérées à la suite de tout dommage mécanique infligé pendant la manipulation après récolte. Ces enzymes commencent à décomposer le matériel cellulaire. Les réactions chimiques catalysées par les enzymes entraînent la dégradation de la qualité des aliments, comme le développement de saveurs étrangères, la détérioration de la texture et la perte de nutriments. Les micro-organismes typiques qui causent la détérioration des aliments sont les bactéries (p. ex., *Lactobacillus*), les levures (p. ex., *Saccharomyces*) et les moisissures (p. ex., *Rhizopus*).

Contamination microbienne



Les bactéries et les champignons (levures et moisissures) sont les principaux types de micro-organismes qui causent la détérioration des aliments et les maladies d'origine alimentaire. Les aliments peuvent être contaminés par des micro-organismes à tout moment pendant la récolte, l'entreposage, la transformation, la distribution, la manipulation ou la préparation. Les principales sources de contamination microbienne sont le sol, l'air, les aliments pour animaux, les peaux et les intestins d'animaux, les surfaces végétales, les eaux usées et les machines ou ustensiles de transformation des aliments.

- **Bactéries**

Les bactéries sont des organismes unicellulaires qui ont une structure interne simple par rapport aux cellules d'autres organismes. L'augmentation du nombre de bactéries dans une population est communément appelée croissance bactérienne par les microbiologistes. Cette croissance est le résultat de la division d'une cellule bactérienne en deux cellules bactériennes identiques, un processus appelé fission binaire. Dans des conditions de croissance optimales, une cellule bactérienne peut se diviser environ toutes les 20 minutes. Ainsi, une seule cellule peut produire près de 70 milliards de cellules en 12 heures. Les facteurs qui influencent la croissance des bactéries comprennent la disponibilité des nutriments, l'humidité, le pH, les niveaux d'oxygène et la présence ou l'absence de substances inhibitrices (p. ex., antibiotiques).

Les besoins nutritionnels de la plupart des bactéries sont des éléments chimiques tels que carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre, magnésium, potassium, sodium, calcium et fer. Les bactéries obtiennent ces éléments en utilisant les gaz de

l'atmosphère et en métabolisant certains constituants alimentaires comme les glucides et les protéines.

La température et le pH jouent un rôle important dans le contrôle des taux de croissance des bactéries. Les bactéries peuvent être classées en trois groupes en fonction de leur température requise pour une croissance optimale : les thermophiles (55-75 °C ou 130-170 °F), les mésophiles (20-45 °C ou 70-115 °F) ou les psychrophiles (10-20 °C ou 50-70 °F). De plus, la plupart des bactéries se développent mieux dans un environnement neutre (pH égal à 7).

Les bactéries ont également besoin d'une certaine quantité d'eau disponible pour leur croissance. La disponibilité de l'eau est exprimée en tant qu'activité de l'eau et est définie par le rapport de la pression de vapeur de l'eau dans l'aliment à la pression de vapeur de l'eau pure à une température donnée. Par conséquent, l'activité de l'eau de tout produit alimentaire est toujours une valeur comprise entre 0 et 1, 0 représentant une absence d'eau et 1 une eau pure. La plupart des bactéries ne se développent pas dans les aliments dont l'activité de l'eau est inférieure à 0,91, bien que certaines bactéries halophiles (celles qui peuvent tolérer de fortes concentrations de sel) puissent se développer dans les aliments dont l'activité de l'eau est inférieure à 0,75. La croissance peut être contrôlée en réduisant l'activité de l'eau - soit en ajoutant des solutés tels que du sucre, du glycérol et du sel, soit en éliminant l'eau par déshydratation.

Les besoins en oxygène pour une croissance optimale varient considérablement d'une bactérie à l'autre. Certaines bactéries ont besoin de la présence d'oxygène libre pour leur croissance et sont appelées aérobies obligatoires, tandis que d'autres bactéries sont empoisonnées par la présence d'oxygène et sont appelées anaérobies obligatoires. Les anaérobies facultatifs sont des bactéries qui peuvent se développer en présence ou en l'absence d'oxygène. En plus de la concentration d'oxygène, le potentiel de réduction de l'oxygène du milieu de croissance influence la croissance bactérienne. Le potentiel de réduction de l'oxygène est une mesure relative de la capacité oxydante ou réductrice du milieu de croissance.

Lorsque les bactéries contaminent un substrat alimentaire, il faut un certain temps avant qu'elles ne commencent à pousser. Cette phase de latence est la période pendant laquelle les bactéries s'adaptent à l'environnement. Après la phase de latence, il y a la phase logarithmique, au cours de laquelle la population croît de façon logarithmique. Au fur et à mesure que la population augmente, les bactéries consomment les nutriments

disponibles et produisent des déchets. Lorsque l'apport en nutriments est épuisé, le taux de croissance entre dans une phase stationnaire dans laquelle le nombre de cellules bactériennes viables reste le même. Pendant la phase stationnaire, le taux de croissance des cellules bactériennes est égal au taux de mort cellulaire bactérienne. Lorsque le taux de mort cellulaire devient supérieur au taux de croissance cellulaire, la population entre dans la phase de déclin.

Une population bactérienne est exprimée soit par gramme, soit par centimètre carré de surface. Rarement la population bactérienne totale dépasse 10^{10} cellules par gramme. Une population de moins de 10^6 cellules par gramme ne provoque pas de détérioration notable, sauf dans le lait cru. Des populations de 10^6 à 10^7 cellules par gramme causent la détérioration de certains aliments ; par exemple, elles peuvent générer des odeurs désagréables dans les viandes emballées sous vide. Des populations de 10^7 à 10^8 cellules par gramme produisent des odeurs désagréables dans les viandes et certains légumes. À des niveaux supérieurs à 5×10^7 cellules par gramme, la plupart des aliments présentent une certaine forme de détérioration.

Lorsque les conditions de croissance des cellules bactériennes sont défavorables (p. ex. températures basses ou élevées ou faible teneur en humidité), plusieurs espèces de bactéries peuvent produire des cellules résistantes appelées endospores. Les endospores sont très résistantes à la chaleur, aux produits chimiques, à la dessiccation (dessèchement) et à la lumière ultraviolette. Les endospores peuvent rester dormantes pendant de longues périodes. Lorsque les conditions deviennent favorables à la croissance (p. ex., décongélation des viandes), les endospores germent et produisent des cellules viables qui peuvent commencer une croissance exponentielle.

- **Champignons**

Les deux types de champignons qui sont importants dans la détérioration des aliments sont les levures et les moisissures. Les moisissures sont des champignons multicellulaires qui se reproduisent par la formation de spores (cellules uniques qui peuvent se transformer en champignon mature). Les spores se forment en grand nombre et se dispersent facilement dans l'air. Une fois que ces spores ont atterri sur un substrat alimentaire, elles peuvent croître et se reproduire si les conditions sont favorables. Les levures sont des champignons unicellulaires beaucoup plus gros que les cellules bactériennes. Ils se reproduisent par division cellulaire (fission binaire) ou par bourgeonnement.

Les conditions affectant la croissance des champignons sont similaires à celles affectant les bactéries. Les levures et les moisissures peuvent se développer dans un environnement acide (pH inférieur à 7). La plage de pH pour la croissance des levures est de 3,5 à 4,5 et pour les moisissures de 3,5 à 8,0. Le faible pH des fruits est généralement défavorable à la croissance des bactéries, mais les levures et les moisissures peuvent se développer et causer la détérioration des fruits. Par exemple, les espèces du genre fongique *Colletotrichum* provoquent la pourriture du collet chez les bananes. Les levures favorisent la fermentation des fruits en décomposant les sucres en alcool et en dioxyde de carbone. La quantité d'eau disponible dans un produit alimentaire est également critique pour la croissance des champignons. Les levures sont incapables de croître à une activité de l'eau inférieure à 0,9 et les moisissures sont incapables de croître à une activité de l'eau inférieure à 0,8.

- **Contrôle de la contamination microbienne**

Les méthodes les plus couramment utilisées pour tuer ou réduire la croissance des micro-organismes sont l'application de chaleur, l'élimination de l'eau, l'abaissement de la température pendant l'entreposage, la réduction du pH, le contrôle des concentrations en oxygène et en dioxyde de carbone et l'élimination des nutriments nécessaires à la croissance. L'utilisation de produits chimiques comme agents de conservation est strictement réglementée par des organismes gouvernementaux tels que la Food and Drug Administration (FDA) aux États-Unis. Bien qu'un produit chimique puisse avoir des fonctions de conservation, son innocuité doit être prouvée avant qu'il puisse être utilisé dans les produits alimentaires. Un certain nombre d'agents de conservation chimiques sont autorisés pour supprimer la prolifération de levures et de moisissures dans les aliments. Aux États-Unis, la liste de ces produits chimiques, connus sous le nom de GRAS (Generally Recognized as Safe), comprend des composés comme l'acide benzoïque, le benzoate de sodium, l'acide propionique, l'acide sorbique et le diacétate de sodium.

Détérioration chimique

- **Réactions enzymatiques**

Les enzymes sont de grosses molécules protéiques qui agissent comme des catalyseurs biologiques, accélérant les réactions chimiques sans être elles-mêmes

consommées dans une mesure appréciable. L'activité des enzymes est spécifique à un certain ensemble de substrats chimiques et dépend à la fois du pH et de la température.

Les tissus vivants des plantes et des animaux maintiennent un équilibre de l'activité enzymatique. Cet équilibre est rompu lors de la récolte ou de l'abattage. Dans certains cas, les enzymes qui jouent un rôle utile dans les tissus vivants peuvent catalyser des réactions de détérioration après la récolte ou l'abattage. Par exemple, l'enzyme pepsine se trouve dans l'estomac de tous les animaux et participe à la dégradation des protéines pendant le processus normal de digestion. Cependant, peu après l'abattage d'un animal, la pepsine commence à décomposer les protéines des organes, affaiblissant les tissus et les rendant plus sensibles à la contamination microbienne. Après la récolte des fruits, certaines enzymes restent actives dans les cellules des tissus végétaux. Ces enzymes continuent de catalyser les processus biochimiques de maturation et peuvent éventuellement conduire à la pourriture, comme on peut l'observer dans les bananes. De plus, les enzymes oxydatives des fruits continuent d'effectuer la respiration cellulaire (le processus d'utilisation de l'oxygène pour métaboliser le glucose en énergie). Cette respiration continue diminue la durée de conservation des fruits frais et peut entraîner leur détérioration. La respiration peut être contrôlée par l'entreposage réfrigéré ou l'emballage sous atmosphère modifiée. Le tableau 1 énumère un certain nombre d'enzymes impliquées dans la dégradation de la qualité des aliments.

Enzyme	Aliment	Action de détérioration
acide ascorbique oxydase	légumes	destruction de la vitamine C
lipase	céréales	décoloration
	lait	rancissement hydrolytique
	huiles	rancissement hydrolytique
lipoxygénase	légumes	destruction de la vitamine A

enzyme pectic	jus d'agrumes	destruction des substances pectiques
	fruits	ramollissement excessif
peroxidase	fruits	brunissement
polyphénoloxydase	fruits, légumes	brunissement, goût désagréable, perte de vitamines
protéger	oeufs	réduction de la durée de conservation des œufs entiers frais et séchés
	crabe, homard	consistance ramolie
	semoule	réduction de la formation de gluten
thiaminase	viandes, poissons	destruction de la thiamine

- **Autoxydation**

Les acides gras insaturés présents dans les lipides de nombreux aliments sont sensibles à la dégradation chimique lorsqu'ils sont exposés à l'oxygène. L'oxydation des acides gras insaturés est autocatalytique, c'est-à-dire qu'elle se fait par réaction en chaîne radicalaire. Les radicaux libres contiennent un électron non apparié (représenté par un point dans la formule moléculaire) et sont donc des molécules chimiques très réactives. Les mécanismes de base d'une réaction en chaîne radicalaire impliquent des étapes d'initiation, de propagation et de terminaison (Figure 1). Dans certaines conditions, lors de l'initiation, une molécule radicalaire (X -) présente dans l'aliment élimine un atome d'hydrogène (H) d'une molécule lipidique, produisant un radical lipidique (L -). Ce radical lipidique réagit avec l'oxygène moléculaire (O₂) pour former un radical peroxy (LOO -). Le radical peroxy élimine un atome d'hydrogène d'une autre molécule lipidique et la réaction recommence (propagation). Au cours des étapes de propagation, des molécules d'hydroperoxyde (LOOH) se forment qui peuvent se décomposer en radicaux alcoxy (LO -) et peroxy plus eau (H₂O). Les radicaux lipides, alcoxy et peroxy peuvent se combiner entre eux (ou avec d'autres radicaux) pour former des produits stables et non propageants (terminaison). Ces produits entraînent le développement d'arômes rance et rance. En plus de favoriser le rancissement, les

radicaux libres et les peroxydes produits par ces réactions peuvent avoir d'autres effets négatifs, comme le blanchiment des colorants alimentaires et la destruction des vitamines A, C et E. Ce type de détérioration est fréquent dans les collations frites, les noix, les huiles alimentaires et la margarine.

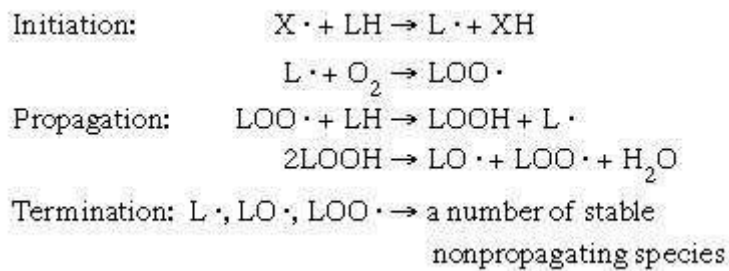


Figure 1 : L'autoxydation des acides gras non-saturés.

- **Réaction de Maillard**

Une autre réaction chimique qui provoque une altération importante des aliments est le brunissement non enzymatique, également connu sous le nom de réaction de Maillard. Cette réaction a lieu entre les sucres réducteurs (monosaccharides simples capables de réaliser des réactions de réduction) et le groupe amino des protéines ou acides aminés présents dans les aliments. Les produits de la réaction de Maillard entraînent un assombrissement de la couleur, une réduction de la solubilité des protéines, le développement d'arômes amers et une disponibilité nutritionnelle réduite de certains acides aminés comme la lysine. La vitesse de cette réaction est influencée par l'activité de l'eau, la température et le pH du produit alimentaire. Le brunissement non enzymatique provoque la détérioration pendant l'entreposage du lait en poudre, des œufs entiers en poudre et des céréales pour petit déjeuner.

- **Réactions induites par la lumière**

La lumière influence un certain nombre de réactions chimiques qui conduisent à la détérioration des aliments. Ces réactions induites par la lumière comprennent la destruction de la chlorophylle (le pigment photosynthétique qui donne aux plantes leur couleur verte), ce qui entraîne le blanchiment de certains légumes, la décoloration de la viande fraîche, la destruction de la riboflavine dans le lait et l'oxydation de la vitamine C et des pigments caroténoïdes (un procédé appelé oxydation photosensibilisée).

L'utilisation de matériaux d'emballage qui empêchent l'exposition à la lumière est l'un

des moyens les plus efficaces de prévenir la détérioration chimique induite par la lumière.

Conservation à basse température



Le stockage à basse température prolonge la durée de conservation de nombreux aliments. En général, les basses températures réduisent le taux de croissance des micro-organismes et ralentissent bon nombre des réactions physiques et chimiques qui se produisent dans les aliments.

Réfrigération

La durée de vie de nombreux aliments peut être prolongée en les entreposant à des températures inférieures à 4 °C (40 °F). Les aliments généralement réfrigérés comprennent les fruits et légumes frais, les œufs, les produits laitiers et les viandes. Certains aliments, comme les fruits tropicaux (p. ex., les bananes), sont endommagés s'ils sont exposés à de basses températures. De plus, la réfrigération ne peut pas améliorer la qualité des aliments en décomposition ; elle ne peut que retarder leur détérioration. Un problème de réfrigération mécanique moderne - celui de la

déshydratation des aliments due à la condensation de l'humidité - a été résolu grâce à des mécanismes de contrôle de l'humidité dans la chambre de stockage et à des techniques d'emballage appropriées.

Congélation

La congélation et l'entreposage congelé constituent un excellent moyen de préserver la qualité nutritionnelle des aliments. À des températures inférieures au point de congélation, la perte d'éléments nutritifs est extrêmement lente pendant la période d'entreposage typique utilisée dans le commerce commercial.

- **Histoire**

Les premières méthodes de congélation reposaient sur le principe que le mélange du sel et de la glace produisait des températures bien inférieures à 0 °C (32 °F). À la fin du XIXe siècle, cette méthode était utilisée commercialement aux États-Unis pour congeler le poisson et la volaille. Dans les années 1920, Clarence Birdseye avait mis au point deux procédés de congélation du poisson fondés sur sa théorie de la congélation rapide. Son premier brevet, décrivant une méthode de conservation des produits de la pêche, consistait à placer les aliments entre deux plaques métalliques refroidies par une solution de chlorure de calcium à environ -40 °C (-40 °F). Le deuxième procédé utilisait deux plaques métalliques creuses qui étaient refroidies à -25 °C (-13 °F) par vaporisation d'ammoniac. Cet appareil de congélation a été le précurseur du congélateur à plaques multiples qui est largement utilisé dans l'industrie alimentaire moderne.

- **Le processus de congélation**

La congélation des aliments consiste à abaisser leur température en dessous de 0 °C, ce qui entraîne la transformation progressive de l'eau, présente dans les aliments, en glace. La congélation est un processus de cristallisation qui commence avec un noyau ou une graine dérivé soit d'une particule non aqueuse, soit d'un groupe de molécules d'eau (formé lorsque la température est réduite en dessous de 0 °C). Cette graine doit être d'une certaine taille pour fournir un site adéquat pour que le cristal puisse commencer à croître. Si les conditions physiques sont propices à la présence de nombreuses graines pour la cristallisation, un grand nombre de petits cristaux de glace se formeront. Cependant, si seulement quelques graines sont disponibles au départ, quelques cristaux de glace se formeront et chacun grandira jusqu'à atteindre une grande

taille. La taille et le nombre de cristaux de glace influencent la qualité finale de nombreux aliments congelés ; par exemple, la texture lisse de la crème glacée indique la présence d'un grand nombre de petits cristaux de glace.

Dans l'eau pure, le processus de congélation est initié en abaissant la température à un peu moins de 0 °C, appelé sursurcoolissement. Lorsque les cristaux de glace commencent à croître, la température revient au point de congélation. Pendant la transformation de l'eau liquide en glace, la température du système ne change pas. La chaleur retirée lors de cette étape est appelée chaleur latente de fusion (équivalente à 333 joules par gramme d'eau). Une fois que toute l'eau est transformée en glace, tout retrait supplémentaire de chaleur entraînera une baisse de la température en dessous de 0 °C.

La congélation des aliments présente un certain nombre de différences importantes par rapport à la congélation de l'eau pure. Les aliments ne gèlent pas à 0 °C. En raison de la présence de différentes particules solubles (solutés) dans l'eau présente dans les aliments, la plupart des aliments commencent à geler à une température comprise entre 0 et -5 °C (32 et 23 °F). De plus, l'élimination de la chaleur latente dans les aliments pendant la congélation ne se produit pas à une température fixe. Lorsque l'eau présente dans les aliments gèle en glace, l'eau restante devient plus concentrée avec les solutés. Par conséquent, le point de congélation est encore plus bas. Par conséquent, les aliments ont une zone de formation maximale de cristaux de glace qui s'étend généralement de -1 à -4 °C (30 à 25 °F). Les dommages à la qualité des aliments pendant la congélation peuvent être réduits au minimum si la température du produit est ramenée en dessous de cette plage de température le plus rapidement possible.

- **Congélateurs industriels**

La vitesse à laquelle la chaleur est retirée d'un aliment pendant la congélation dépend de la vitesse à laquelle la chaleur peut se déplacer dans l'aliment et de l'efficacité avec laquelle elle peut être libérée de la surface de l'aliment dans l'atmosphère environnante. Les congélateurs industriels enlèvent la chaleur de la surface d'un aliment le plus rapidement possible. Il existe plusieurs types de congélateurs industriels, y compris les congélateurs à tunnel à air comprimé, les congélateurs à bandes, les congélateurs à lit fluidisé, les congélateurs à plaques et les congélateurs cryogéniques.

Dans les tunnels de congélation à air soufflé et les tunnels de congélation à bande, de l'air prérefroidi à environ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ est soufflé sur les produits alimentaires. Les aliments emballés, comme les fruits, les légumes, les produits de boulangerie, la volaille, les viandes et les plats préparés, sont habituellement congelés dans des tunnels à air soufflé. Les paquets sont placés sur des chariots ou des chariots manuels, puis roulés dans les tunnels de congélation. Dans un congélateur à tapis roulant, les aliments sont placés sur un tapis roulant qui se déplace dans une zone de congélation. Les produits de boulangerie, les morceaux de poulet et les galettes de viande sont congelés à l'aide d'un congélateur à tapis.

Les congélateurs à lit fluidisé sont utilisés pour congeler des aliments en particules comme les pois, le maïs coupé, les carottes en dés et les fraises. Les aliments sont placés sur un convoyeur à mailles et déplacés à travers une zone de congélation dans laquelle l'air froid est dirigé vers le haut à travers le convoyeur à mailles et les particules alimentaires commencent à tomber et à flotter. Ce culbutage expose tous les côtés de l'aliment à l'air froid et minimise la résistance au transfert de chaleur à la surface de l'aliment.

Les congélateurs à plaques sont utilisés pour congeler des produits plats, comme les pâtisseries, les filets de poisson et les galettes de bœuf, ainsi que des légumes de forme irrégulière emballés dans des contenants en brique, comme les asperges, le chou-fleur, les épinards et le brocoli. Les aliments sont fermement pressés entre des plaques métalliques qui sont refroidies à des températures inférieures au point de congélation par des réfrigérants à circulation interne.

La congélation cryogénique est utilisée pour congeler les aliments à un rythme extrêmement rapide. Les aliments sont transportés par pulvérisation d'azote liquide ou directement immergés dans l'azote liquide. L'azote liquide bout autour des aliments à une température de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-321\text{ }^{\circ}\text{F}$) et extrait une grande quantité de chaleur.

- **Qualité des aliments congelés**

La congélation ou l'entreposage inadéquats des aliments peuvent entraîner des changements de qualité préjudiciables. Lorsque des aliments contenant de grandes quantités d'eau sont congelés lentement, ils peuvent subir une perte de liquide, appelée goutte à goutte, au moment de leur décongélation. Cette perte de liquide entraîne la déshydratation et la perte de nutriments dans les produits alimentaires congelés.

Pendant l'entreposage congelé, les cristaux de glace présents dans les aliments peuvent prendre de l'expansion et produire des changements de texture indésirables. Ce phénomène est couramment observé lorsqu'on laisse la température de stockage fluctuer. Par exemple, la crème glacée stockée dans un congélateur domestique à dégivrage automatique devient de texture sableuse parce que les cristaux de glace augmentent en taille à mesure que la température du système fluctue.

Les aliments congelés mal emballés perdent de petites quantités d'humidité pendant l'entreposage, ce qui entraîne une déshydratation en surface (communément appelée brûlure de congélation). Les viandes congelées avec brûlure de congélation ont l'apparence du papier brun et deviennent rapidement rances. Les brûlures de congélation peuvent être réduites au minimum grâce à l'utilisation d'emballages hermétiques et à l'élimination des fluctuations de température pendant l'entreposage.

Le fameux plateau de conservation des aliments si prisé sur internet prolonge considérablement la fraîcheur des aliments, même s'il ne fait pas le vide dans leur espace de confinement :



Traitement thermique

Le traitement thermique est défini comme la combinaison de la température et du temps requis pour éliminer un nombre souhaité de micro-organismes d'un produit alimentaire.

Mise en conserve

Nicolas Appert, pâtissier parisien de métier, est reconnu pour avoir fait de la transformation thermique des aliments une industrie. En 1810, il reçut une reconnaissance officielle pour son procédé d'enfermer les aliments dans des bouteilles, de boucher les bouteilles et de les placer dans de l'eau bouillante pendant diverses périodes de temps. La même année, Peter Durand a obtenu un brevet britannique pour l'utilisation de récipients en verre, en poterie, en étain ou en autres métaux pour la conservation thermique des aliments. En 1822, Ezra Daggett et Thomas Kensett annoncent la disponibilité de conserves dans des boîtes de conserve aux États-Unis. Les conteneurs en acier étamés, fabriqués à partir de 98,5 % de tôle d'acier avec une mince couche d'étain, sont rapidement devenus courants. Ces boîtes étaient munies d'une double couture en haut et en bas pour assurer une étanchéité à l'air et pouvaient être fabriquées à des vitesses élevées.

Ce n'est qu'en 1896 qu'Émile van Ermengem découvre le microorganisme *Clostridium botulinum*, dont la toxine mortelle est à l'origine du botulisme, que le processus de mise en conserve a été établi sur une base plus scientifique.

- **Procédures de pré-stérilisation**

Des variétés de cultures sélectionnées sont cultivées spécialement pour la mise en conserve. Les calendriers de récolte des cultures sont soigneusement sélectionnés pour être conformes aux opérations de la conserverie. Une opération typique de mise en conserve comprend le nettoyage, le remplissage, l'extraction, le scellage, le traitement thermique, la cuisson, l'étiquetage, le conditionnement et le stockage. La plupart de ces opérations sont effectuées à l'aide de machines automatiques à grande vitesse.

Le nettoyage nécessite l'utilisation d'agitateurs, de nettoyeurs à tambour rotatif, de sableuses à air, de pulvérisateurs d'eau (comme le montre la figure 2) ou de rondelles plongeantes. Toute matière non comestible ou étrangère est enlevée avant le lavage et seule de l'eau potable est utilisée dans les systèmes de nettoyage.



Lavage par pulvérisation des tomates récoltées avant la transformation.

Les machines de remplissage automatiques sont utilisées pour placer les aliments nettoyés dans des boîtes de conserve ou d'autres récipients, tels que des pots en verre ou des sachets en plastique. Lorsque des aliments contenant de l'air emprisonné, comme des légumes-feuilles, sont mis en conserve, l'air doit être évacué des boîtes avant de fermer et de sceller les couvercles par un procédé appelé épuisement. L'évacuation des gaz d'échappement s'effectue à l'aide de hottes d'évacuation de la vapeur ou par création d'un vide.

Immédiatement après l'extraction, les couvercles sont placés sur les boîtes et les boîtes sont scellées. Un joint étanche à l'air est réalisé entre le couvercle et le bord de la boîte

à l'aide d'une mince couche de joint ou de composé. Les conditions anaérobies empêchent la croissance des micro-organismes qui ont besoin d'oxygène. En outre, de nombreuses spores de micro-organismes anaérobies sont moins résistantes à la chaleur et sont facilement détruites pendant le traitement thermique.

- **Stérilisation**

Le temps et la température requis pour la stérilisation des aliments sont influencés par plusieurs facteurs, notamment le type de micro-organismes présents sur l'aliment, la taille du contenant, l'acidité ou le pH de l'aliment et la méthode de chauffage.

Les procédés thermiques de mise en conserve sont généralement conçus pour détruire les spores de la bactérie *C. botulinum*. Ce micro-organisme peut facilement se développer dans des conditions anaérobies, produisant la toxine mortelle qui cause le botulisme. La stérilisation nécessite un chauffage à des températures supérieures à 100 °C (212 °F). Cependant, *C. botulinum* n'est pas viable dans les aliments acides dont le pH est inférieur à 4,6. Ces aliments peuvent être traités adéquatement par immersion dans l'eau à des températures légèrement inférieures à 100 °C.

La stérilisation des aliments à faible acidité (pH supérieur à 4,6) s'effectue généralement dans des récipients à vapeur appelés autoclaves à des températures allant de 116 à 129 °C (240 à 265 °F). Les autoclaves sont contrôlés par des dispositifs automatiques et des registres détaillés sont tenus sur le temps et la température de traitement pour chaque lot de boîtes traitées. A la fin du cycle de chauffage, les boîtes sont refroidies sous pulvérisation d'eau ou au bain-marie à environ 38 °C (100 °F) et séchées pour éviter toute rouille de surface. Les boîtes sont ensuite étiquetées, placées dans des caisses en carton à la main ou à la machine et entreposées dans des entrepôts frais et secs.

- **Qualité des aliments en conserve**

Le processus de stérilisation est conçu pour fournir le traitement thermique nécessaire à l'endroit de chauffage le plus lent à l'intérieur de la boîte, appelé le point froid. Les zones les plus éloignées du point froid subissent un traitement thermique plus sévère qui peut entraîner un surtraitement et une dégradation de la qualité globale du produit. Les sachets plats laminés peuvent réduire les dommages causés par la chaleur lors du surtraitement.

Une perte importante de nutriments, en particulier de vitamines thermolabiles, peut se produire pendant le processus de mise en conserve. En général, la mise en conserve n'a pas d'effet majeur sur la teneur en glucides, en protéines ou en matières grasses des aliments. Les vitamines A et D et le bêta-carotène résistent aux effets de la chaleur. Cependant, la vitamine B1 est sensible au traitement thermique et au pH de l'aliment. Bien que les conditions anaérobies des aliments en conserve aient un effet protecteur sur la stabilité de la vitamine C, celle-ci est détruite pendant de longs traitements thermiques.

Les extrémités des boîtes de conserve traitées sont légèrement concave en raison du vide interne créé pendant la soudure. Tout renflement des extrémités d'une boîte peut indiquer une détérioration de la qualité due à des facteurs mécaniques, chimiques ou physiques. Ce gonflement peut entraîner un gonflement et une explosion possible de la boîte.

Pasteurisation

La pasteurisation est l'application de chaleur à un produit alimentaire afin de détruire les micro-organismes pathogènes (pathogènes), d'inactiver les enzymes responsables de la détérioration et de réduire ou détruire les micro-organismes responsables de la détérioration. Le traitement thermique relativement doux utilisé dans le processus de pasteurisation entraîne des changements minimes dans les caractéristiques sensorielles et nutritionnelles des aliments comparativement aux traitements thermiques sévères utilisés dans le processus de stérilisation.

La température et la durée du processus de pasteurisation sont influencées par le pH de l'aliment. Lorsque le pH est inférieur à 4,5, les micro-organismes et les enzymes de détérioration sont les principales cibles de la pasteurisation. Par exemple, le processus de pasteurisation des jus de fruits vise à inactiver certaines enzymes comme la pectinesterase et la polygalacturonase. Les conditions de traitement typiques pour la pasteurisation des jus de fruits comprennent le chauffage à 77 °C (171 °F) et le maintien pendant 1 minute, suivi d'un refroidissement rapide à 7 °C (45 °F). En plus d'inactiver les enzymes, ces conditions détruisent toutes les levures ou moisissures qui peuvent conduire à la détérioration. Les conditions équivalentes capables de réduire la détérioration des micro-organismes impliquent de chauffer à 65 °C (149 °F) et de

maintenir pendant 30 minutes ou de chauffer à 88 °C (190 °F) et de maintenir pendant 15 secondes.

Lorsque le pH d'un aliment est supérieur à 4,5, le traitement thermique doit être suffisamment rigoureux pour détruire les bactéries pathogènes. Dans la pasteurisation du lait, les conditions de temps et de température ciblent les bactéries pathogènes *Mycobacterium tuberculosis*, *Coxiella burnetti* et *Brucella abortus*. Le traitement thermique typique utilisé pour la pasteurisation du lait est de 72 °C (162 °F) pendant 15 secondes, suivi d'un refroidissement rapide à 7 °C. Les autres traitements thermiques équivalents comprennent le chauffage à 63 °C (145 °F) pendant 30 minutes, 90 °C (194 °F) pendant 0,5 seconde et 94 °C (201 °F) pendant 0,1 seconde. Les traitements à haute température et à court terme (HTST) causent moins de dommages à la composition nutritive et aux caractéristiques sensorielles des aliments et sont donc préférés aux traitements à basse température et à long terme (LTLT).

Puisque le traitement thermique de la pasteurisation n'est pas assez sévère pour rendre un produit stérile, des méthodes supplémentaires telles que la réfrigération, la fermentation ou l'ajout de produits chimiques sont souvent utilisées pour contrôler la croissance microbienne et pour prolonger la durée de conservation d'un produit. Par exemple, la pasteurisation du lait ne tue pas les bactéries thermodurcissables (celles qui résistent à la chaleur), comme les Lactobacilles et les Streptocoques, ni les bactéries thermophiles (celles qui poussent à haute température), comme les Bacillus et Clostridium. Par conséquent, le lait pasteurisé doit être conservé dans des conditions réfrigérées.

Les aliments liquides comme le lait, les jus de fruits, les bières, les vins et les œufs liquides sont pasteurisés au moyen d'échangeurs de chaleur à plaques. Le vin et les jus de fruits sont normalement dégazés avant la pasteurisation afin d'éliminer l'oxygène et de minimiser la détérioration oxydative des produits. Les échangeurs de chaleur à plaques se composent d'un grand nombre de plaques d'acier minces et verticales qui sont serrées ensemble dans un cadre. Les plaques sont séparées par de petits joints qui permettent au liquide de s'écouler entre chaque plaque successive. Le produit liquide et le fluide de chauffage (p. ex. eau chaude) sont pompés par des canaux alternatifs, et les joints d'étanchéité assurent que le produit liquide et le fluide de chauffage ou de refroidissement restent séparés. Les échangeurs de chaleur à plaques sont efficaces dans les applications de chauffage et de refroidissement rapides. Une fois le processus

de pasteurisation terminé, le produit est conditionné dans des conditions aseptiques afin d'éviter sa recontamination.

Traitement aseptique

Le processus aseptique consiste à placer un produit stérilisé dans un emballage stérilisé qui est ensuite scellé dans des conditions stériles. Elle a commencé en 1914 avec le développement de filtres stériles destinés à l'industrie vitivinicole. Cependant, en raison du manque de fiabilité de la machinerie, elle est restée commercialement inefficace jusqu'en 1948 lorsque William McKinley Martin a aidé à développer le système Martin, qui est devenu plus tard connu sous le nom de Dole Aseptic Canning System. Ce système impliquait la stérilisation des aliments liquides en les chauffant rapidement dans des échangeurs de chaleur tubulaires, suivie d'étapes de maintien et de refroidissement. Les boîtes et les couvercles ont été stérilisés à la vapeur surchauffée, et les récipients stérilisés ont été remplis d'aliments liquides stériles. Les couvercles ont ensuite été scellés dans une atmosphère de vapeur surchauffée. Dans les années 1980, le peroxyde d'hydrogène était utilisé dans toute l'Europe et aux États-Unis pour la stérilisation des surfaces en polyéthylène.

- **Stérilité commerciale**

Dans le traitement aseptique, le processus thermique est basé sur l'obtention d'une stérilisation commerciale, c'est-à-dire pas plus d'un emballage non stérile pour 10.000 emballages traités. Le procédé aseptique utilise la méthode HTST (High-Temperature-Short-Time) qui consiste à chauffer les aliments à haute température pendant une courte période de temps. Les conditions de temps et de température dépendent de plusieurs facteurs, tels que la taille, la forme et le type d'aliment. La méthode HTST permet de mieux conserver les caractéristiques de qualité, comme les vitamines, l'odeur, la saveur et la texture, tout en obtenant le même niveau de stérilité que le procédé traditionnel de mise en conserve dans lequel les aliments sont chauffés à une température inférieure pendant une plus longue période.

Le chauffage et le refroidissement des aliments liquides peuvent être effectués à l'aide d'échangeurs de chaleur à plaques métalliques. Ces échangeurs de chaleur ont de grandes surfaces qui permettent d'améliorer les vitesses de chauffage et de refroidissement. D'autres types d'échangeurs de chaleur consistent à entourer les aliments de vapeur ou à injecter directement de la vapeur dans les aliments. Les

produits stérilisés à la vapeur sont ensuite pompés dans une chambre à vide où ils sont refroidis rapidement.

Les aliments liquides qui contiennent de grosses particules solides sont chauffés dans des échangeurs de chaleur à surface raclée. Ces échangeurs de chaleur utilisent des lames pour racler en continu la surface intérieure de la chambre de chauffe. L'action de raclage protège les aliments très visqueux contre les brûlures sur la surface chauffante.

Une autre méthode de chauffage des aliments, appelée chauffage ohmique, consiste à faire passer un courant électrique basse fréquence de 50 à 60 hertz directement dans les aliments. Un aliment liquide contenant des solides, comme des fruits en dés, est pompé par un tuyau entouré d'électrodes. Le produit est chauffé tant que la conductivité électrique de l'aliment est uniforme dans tout le volume. Cette vitesse de chauffage uniforme empêche le surtraitement de chaque région de l'aliment. Le chauffage ohmique permet d'obtenir un produit alimentaire de qualité supérieure à celui des systèmes conventionnels.

- **Emballage de produits traités de façon aseptique**

Les récipients d'emballage utilisés dans le traitement aseptique sont stérilisés séparément avant d'être utilisés. Les machines d'emballage sont stérilisées à la vapeur, aux gaz stériles ou au peroxyde d'hydrogène. Le processus de stérilisation est généralement surveillé par la culture d'un organisme d'essai. Par exemple, la présence restante de la bactérie *Bacillus subtilis globigii*, très résistante à la chaleur, peut être utilisée comme marqueur pour mesurer l'intégralité de la stérilisation.

Les emballages doivent être scellés dans des conditions stériles, généralement à l'aide de plaques de scellage à haute température. Les aliments qui sont traités aseptiquement n'ont pas besoin d'être réfrigérés pour être entreposés.

Blanchiment

Le blanchiment est un procédé thermique utilisé principalement pour les tissus végétaux avant la congélation, le séchage ou la mise en conserve. Avant la mise en conserve, le blanchiment sert à plusieurs fins, y compris le nettoyage du produit, la réduction de la charge microbienne, l'élimination des gaz piégés et le flétrissement des tissus des légumes à feuilles afin qu'ils puissent être facilement placés dans les contenants. Le

blanchiment inactive également les enzymes qui causent la détérioration des aliments pendant l'entreposage congelé.

Le blanchiment est effectué à des températures proches de 100 °C (212 °F) pendant deux à cinq minutes dans un bain-marie ou une chambre à vapeur. Comme les blanchisseurs à vapeur utilisent une quantité minimale d'eau, il faut faire très attention à ce que le produit soit exposé uniformément à la vapeur. Il est particulièrement difficile de blanchir à la vapeur les légumes à feuilles parce qu'ils ont tendance à s'agglutiner.

L'efficacité du traitement de blanchiment est habituellement déterminée en mesurant l'activité résiduelle d'une enzyme appelée peroxydase.

Contrôle de l'activité de l'eau

Les aliments contenant de fortes concentrations d'eau sont généralement plus sensibles à la détérioration par la contamination microbienne et l'activité enzymatique. La teneur en eau des aliments peut être contrôlée en éliminant l'eau par déshydratation ou en ajoutant des solutés aux aliments. Dans les deux cas, la concentration des solutés dans l'aliment augmente et celle de l'eau diminue.

Déshydratation

La déshydratation, ou séchage, des aliments a longtemps été pratiquée commercialement dans la production de spaghettis et d'autres produits amylacés. Grâce aux progrès réalisés pendant la Seconde Guerre mondiale, cette technique a été appliquée à une liste croissante de produits alimentaires, notamment les fruits, les légumes, le lait écrémé, les pommes de terre, les mélanges à soupe et les viandes.

Les bactéries pathogènes (productrices de toxines) résistent parfois à l'environnement défavorable des aliments secs, provoquant une intoxication alimentaire lorsque le produit est réhydraté et consommé. Le contrôle des contaminants bactériens dans les aliments séchés exige des matières premières de haute qualité ayant une faible contamination, un assainissement adéquat dans l'usine de transformation, une pasteurisation avant séchage et des conditions d'entreposage qui protègent contre l'infection par la poussière, les insectes, les rongeurs et autres animaux.

Les denrées alimentaires peuvent être séchées à l'air, à la vapeur surchauffée, sous vide, dans un gaz inerte ou par application directe de chaleur. L'air est le moyen de séchage le plus généralement utilisé, car il est abondant et pratique et permet un séchage progressif, permettant un contrôle suffisant pour éviter une surchauffe qui pourrait entraîner des brûlures et une décoloration. L'air peut être utilisé à la fois pour transporter la chaleur vers les aliments à sécher et pour évacuer la vapeur d'eau libérée. L'utilisation d'autres gaz nécessite des systèmes spéciaux de récupération de l'humidité.

La perte d'humidité produite par le séchage entraîne une concentration accrue d'éléments nutritifs dans la masse alimentaire restante. Les protéines, les graisses et les glucides présents dans les aliments secs sont présents en plus grande quantité par unité de poids que dans leurs équivalents frais, et la valeur nutritive de la plupart des aliments reconstitués ou réhydratés est comparable à celle des aliments frais. La valeur biologique des protéines séchées dépend toutefois de la méthode de séchage. Une exposition prolongée à des températures élevées peut rendre la protéine moins utile dans l'alimentation. Le traitement à basse température, par contre, peut augmenter la digestibilité des protéines. Certaines vitamines sont sensibles au processus de déshydratation. Par exemple, dans les viandes séchées, des quantités importantes de vitamine C et de vitamines B (riboflavine, thiamine et niacine) sont perdues pendant la déshydratation.

Les œufs séchés, la viande, le lait et les légumes sont habituellement emballés dans des contenants en fer-blanc ou en aluminium. Des panneaux de fibres ou d'autres types de matériaux peuvent être utilisés, mais ils sont moins satisfaisants que le métal, qui offre une protection contre les insectes et la perte ou le gain d'humidité et qui permet un emballage avec un gaz inerte.

Les dessiccants en emballage (agents de séchage) améliorent la stabilité au stockage des pommes de terre blanches déshydratées, des patates douces, du chou, des carottes, des betteraves et des oignons et offrent une protection substantielle contre le brunissement. La rétention de l'acide ascorbique (vitamine C) est nettement améliorée par le conditionnement à des températures allant jusqu'à 49 °C (120 °F) ; le gaz de conditionnement peut être de l'azote ou de l'air.

Une technique connexe, la lyophilisation, utilise des conditions de vide poussé, ce qui permet d'établir des conditions spécifiques de température et de pression. Les aliments crus sont congelés, et les conditions de basse pression font en sorte que la glace dans

les aliments se sublime directement en vapeur (c.-à-d. qu'elle ne passe pas à l'état liquide). Un contrôle adéquat des conditions de transformation contribue à une réhydratation satisfaisante, avec une rétention substantielle des caractéristiques nutritives, de couleur, de saveur et de texture.

Concentration d'aliments humides

Les aliments présentant une acidité substantielle, lorsqu'ils sont concentrés à 65 % ou plus de solides solubles, peuvent être conservés par des traitements thermiques doux. Une teneur élevée en acide n'est pas nécessaire pour conserver des aliments concentrés à plus de 70 % de solides.

La fabrication de gelée et de conserves de fruits, un important sous-produit de l'industrie fruitière, est basée sur le principe à haute teneur en solides et à haute teneur en acide, avec des besoins modérés en traitement thermique. Les fruits qui possèdent d'excellentes qualités mais qui sont visuellement peu attrayants peuvent être conservés et utilisés sous forme de concentrés, qui ont un goût agréable et une valeur nutritive substantielle.

Les gelées et autres conserves de fruits sont préparées à partir de fruits en ajoutant du sucre et en concentrant par évaporation jusqu'à un point où la détérioration microbienne ne peut se produire. Le produit préparé peut être entreposé sans fermeture hermétique, bien qu'une telle protection soit utile pour contrôler la croissance des moisissures, la perte d'humidité et l'oxydation. Dans la pratique moderne, l'étanchéité sous vide a remplacé l'utilisation d'un couvercle en paraffine.

Les caractéristiques gélifiantes des fruits et de leurs extraits sont dues à la pectine, une substance présente en quantité variable dans tous les fruits. Les ingrédients essentiels d'un gel de fruits sont la pectine, l'acide, le sucre et l'eau. Des agents aromatisants et colorants peuvent être ajoutés, ainsi que de la pectine et de l'acide pour pallier toute carence du fruit lui-même.

Les fruits confits et glacés sont obtenus par imprégnation lente du fruit avec du sirop jusqu'à ce que la concentration de sucre dans le tissu soit suffisamment élevée pour empêcher la croissance de micro-organismes de détérioration. Le processus de confiserie est effectué en traitant les fruits avec des sirops dont la concentration en sucre augmente progressivement, de sorte que les fruits ne se ramollissent pas en

confiture ou ne deviennent pas durs et coriaces. Après l'imprégnation du sucre, les fruits sont lavés et séchés. Les fruits confits obtenus peuvent être conditionnés et commercialisés dans cet état ou trempés dans du sirop, puis enrobés d'une fine couche de sucre (glacé) et de nouveau séchés.

Fermentation Et Décapage

Bien que les micro-organismes soient généralement considérés comme responsables de la détérioration, ils sont capables, dans certaines conditions, de produire des effets désirables, y compris la fermentation oxydative et alcoolique. Les micro-organismes qui se développent dans un produit alimentaire et les changements qu'ils produisent sont déterminés par l'acidité, les glucides disponibles, l'oxygène et la température. Une méthode importante de conservation des aliments combine le salage pour contrôler sélectivement les microorganismes et la fermentation pour stabiliser les tissus traités.

- **Fruits et légumes marinés**

Les fruits et légumes frais ramollissent après 24 heures dans une solution aqueuse et commencent une fermentation-putréfaction lente et mixte. L'ajout de sel supprime l'activité microbienne indésirable, créant ainsi un environnement favorable à la fermentation souhaitée. La plupart des légumes verts et des fruits peuvent être conservés par saumurage.

Lorsque le procédé de décapage est appliqué à un concombre, sa réserve de glucides fermentescibles se transforme en acide, sa couleur passe du vert vif au vert olive ou jaune-vert, et son tissu devient translucide. La concentration en sel est maintenue entre 8 et 10 pour cent pendant la première semaine et augmente de 1 pour cent par semaine par la suite jusqu'à ce que la solution atteigne 16 pour cent. Dans des conditions convenablement contrôlées, le concombre salé et fermenté, appelé bouillon de sel, peut être conservé pendant plusieurs années.

Le stock de sel n'est pas un bien de consommation. Il doit être rafraîchi et transformé en produits de consommation. Dans les concombres, on lixivie le sel du concombre séché avec de l'eau tiède (43-54 °C[110-130 °F]) pendant 10 à 14 heures. Ce processus est répété au moins deux fois et, au dernier lavage, de l'alun peut être ajouté pour raffermir le tissu et du curcuma pour améliorer la couleur.

- **Viande marinée**

La viande peut être conservée par salaison à sec ou avec une solution de décapage. Les ingrédients utilisés dans la cure et le saumurage sont le nitrate de sodium, le nitrite de sodium, le chlorure de sodium, le sucre et l'acide citrique ou le vinaigre.

Diverses méthodes sont utilisées : la viande peut être mélangée à des ingrédients secs ; elle peut être trempée dans une solution de saumure ; la solution de saumure peut être pompée ou injectée dans la chair ; ou une combinaison de ces méthodes peut être utilisée.

Le mûrissement peut être combiné avec le fumage. La fumée agit comme un agent déshydratant et enduit les surfaces de la viande avec divers produits chimiques, y compris de petites quantités de formaldéhyde.

Détérioration des produits fermentés et marinés

Les aliments fermentés et les produits marinés nécessitent une protection contre les moisissures, qui métabolisent l'acide développé et permettent l'avancée d'autres micro-organismes. On peut s'attendre à ce que les produits alimentaires fermentés et marinés conservés au frais restent stables pendant plusieurs mois. Des périodes de stockage plus longues exigent une protection plus complète, comme la mise en conserve.

La rétention d'éléments nutritifs dans les produits fermentés et marinés est à peu près égale à celle des produits conservés par d'autres méthodes. Les glucides sont généralement convertis en acide ou en alcool, mais ils ont aussi une valeur nutritive. Dans certains cas, les niveaux de nutriments augmentent en raison de la présence de levures.

Préservation chimique

Les conservateurs chimiques pour aliments sont des substances qui, dans certaines conditions, retardent la croissance des micro-organismes sans nécessairement les détruire ou empêchent la détérioration de leur qualité pendant leur fabrication et leur distribution. Le premier groupe comprend certains constituants naturels des aliments qui, lorsqu'ils sont ajoutés aux aliments, retardent ou empêchent la croissance des micro-organismes. Le sucre est utilisé en partie à cette fin dans la fabrication de confitures, de gelées et de marmelades et dans la confiserie de fruits. L'utilisation du vinaigre et du sel dans le saumurage et de l'alcool dans l'eau-de-vie fait également partie de cette catégorie. Certains produits chimiques étrangers aux aliments sont ajoutés pour empêcher la croissance de micro-organismes. Ce dernier groupe comprend certains constituants alimentaires naturels comme l'acide ascorbique (vitamine C), qui est ajouté aux pêches congelées pour prévenir le brunissement, et une longue liste de composés chimiques étrangers aux aliments et classés comme antioxydants, agents de blanchiment, acidifiants, neutralisants, stabilisateurs, agents raffermissants et humectants.

Conservateurs chimiques organiques

Le benzoate de sodium et d'autres benzoates sont parmi les principaux conservateurs chimiques. L'utilisation de benzoates dans certains produits en quantité prescrite (habituellement pas plus de 0,1 pour cent) est autorisée dans la plupart des pays, dont certains exigent une déclaration de leur utilisation sur l'étiquette du récipient alimentaire. Puisque l'acide benzoïque libre est en fait l'agent actif, les benzoates doivent être utilisés dans un milieu acide pour être efficaces. La capacité des canneberges à résister à une détérioration rapide est attribuée à leur forte teneur en acide benzoïque. L'acide benzoïque est plus efficace contre les levures que contre les moisissures et les bactéries.

D'autres composés organiques utilisés comme agents de conservation comprennent les esters d'acide vanillique, l'acide monochloroacétique, les propionates, l'acide sorbique, l'acide déshydroacétique et les glycols.

Conservateurs chimiques inorganiques

Le dioxyde de soufre et les sulfites sont peut-être les conservateurs chimiques inorganiques les plus importants. Les sulfites sont plus efficaces contre les moisissures que contre les levures et sont largement utilisés dans la conservation des fruits et légumes. Les composés soufrés sont largement utilisés dans la vinification et, comme dans la plupart des autres cas où ce conservateur est utilisé, il faut faire très attention à maintenir les concentrations basses afin d'éviter des effets indésirables sur le goût.

Les agents oxydants tels que les nitrates et les nitrites sont couramment utilisés dans la salaison des viandes.

Irradiation des aliments

L'irradiation des aliments fait appel à des faisceaux d'électrons à haute vitesse ou à des rayonnements à haute énergie dont la longueur d'onde est inférieure à 200 nanomètres ou à 2 000 angströms (p. ex., rayons X et rayons gamma). Ces rayons contiennent suffisamment d'énergie pour briser les liaisons chimiques et ioniser les molécules qui se trouvent sur leur trajet. Les deux sources les plus courantes de rayonnement à haute énergie utilisées dans l'industrie alimentaire sont le cobalt-60 (^{60}Co) et le césium-137 (^{137}Cs). Pour le même niveau d'énergie, les rayons gamma ont un pouvoir de pénétration plus grand dans les aliments que les électrons à grande vitesse.

L'unité de dose de rayonnement absorbée par un matériau est appelée le gris (Gy), un gris étant égal à l'absorption d'un joule d'énergie par un kilogramme de nourriture. L'énergie possédée par un électron est appelée électron-volt (eV). Un eV est la quantité d'énergie cinétique gagnée par un électron lorsqu'il accélère à travers une différence de potentiel électrique d'un volt. Il est généralement plus pratique d'utiliser une unité plus grande comme le mégaélectronvolt (MeV), qui est égal à un million d'électrons-volts.

Effets biologiques de l'irradiation

L'irradiation a des effets directs et indirects sur le matériel biologique. Les effets directs sont dus à la collision du rayonnement avec les atomes, ce qui entraîne l'éjection des électrons des atomes. Les effets indirects sont dus à la formation de radicaux libres

(molécules instables portant un électron supplémentaire) lors de la radiolyse (scission radio-induite) des molécules d'eau. La radiolyse des molécules d'eau produit des radicaux hydroxyles, des espèces très réactives qui interagissent avec les molécules organiques présentes dans les aliments. Les produits de ces interactions sont à l'origine d'un grand nombre des caractéristiques associées à la détérioration des aliments, comme les mauvais goûts et les mauvaises odeurs.

- **Effets positifs**

L'effet bactéricide (bactéricide) du rayonnement ionisant est dû à l'endommagement des biomolécules des cellules bactériennes. Les radicaux libres produits pendant l'irradiation peuvent détruire ou modifier la structure des membranes cellulaires. De plus, les rayonnements provoquent des changements irréversibles dans les molécules d'acides nucléiques (c.-à-d. l'ADN et l'ARN) des cellules bactériennes, inhibant ainsi leur capacité de croissance. Les bactéries pathogènes qui sont incapables de produire des endospores résistantes dans les aliments comme la volaille, la viande et les fruits de mer peuvent être éliminées par des doses de rayonnement de 3 à 10 kg. Si la dose de rayonnement est trop faible, l'ADN endommagé peut être réparé par des enzymes spécialisées. Si de l'oxygène est présent pendant l'irradiation, les bactéries sont plus facilement endommagées. Des doses de l'ordre de 0,2 à 0,36 kg sont nécessaires pour arrêter la reproduction de *Trichinella spiralis* (le ver parasite qui cause la trichinose) dans le porc, bien que des doses beaucoup plus élevées soient nécessaires pour l'éliminer de la viande.

La dose de rayonnement utilisée sur les produits alimentaires est divisée en trois niveaux. La Radappertisation est une dose de l'ordre de 20 à 30 kilogrammes, nécessaire à la stérilisation d'un produit alimentaire. La radiurisation est une dose de 1 à 10 kilogrammes qui, comme la pasteurisation, est utile pour cibler des pathogènes spécifiques. La radioxydation implique des doses inférieures à 1 kilogray pour prolonger la durée de conservation et inhiber la germination.

- **Effets négatifs**

En l'absence d'oxygène, la radiolyse des lipides entraîne le clivage des liaisons interatomiques dans les molécules de graisse, produisant des composés tels que le dioxyde de carbone, les alcanes, les alcènes et les aldéhydes. De plus, les lipides sont très vulnérables à l'oxydation par les radicaux libres, un processus qui produit des peroxydes, des composés carbonylés, des alcools et des lactones. Le rancissement qui

en résulte, résultant de l'irradiation d'aliments riches en matières grasses, est très destructeur pour leur qualité sensorielle. Pour minimiser ces effets nocifs, les aliments gras doivent être emballés sous vide et conservés à des températures inférieures à la température de congélation pendant l'irradiation.

Les protéines ne sont pas dégradées de façon significative aux faibles doses de rayonnement utilisées dans l'industrie alimentaire. Pour cette raison, l'irradiation n'active pas les enzymes impliquées dans la détérioration des aliments, car la plupart des enzymes survivent à des doses pouvant atteindre 10 kGy. D'autre part, les grosses molécules d'hydrates de carbone qui structurent les aliments sont dépolymérisées (décomposées) par irradiation. Cette dépolymérisation réduit le pouvoir gélifiant des longues chaînes de glucides structuraux. Toutefois, dans la plupart des aliments, une certaine protection contre ces effets délétères est assurée par d'autres constituants alimentaires. Les vitamines A, E et B1 (thiamine) sont également sensibles à l'irradiation. Les pertes nutritionnelles d'un produit alimentaire sont élevées si l'air n'est pas exclu lors de l'irradiation.

Préoccupations liées à la sécurité

Compte tenu des effets bénéfiques de l'irradiation sur certains aliments, plusieurs pays ont autorisé son utilisation à des fins spécifiques, comme l'inhibition de la germination des pommes de terre, des oignons et de l'ail ; la prolongation de la durée de conservation des fraises, mangues, poires, raisins, cerises, groseilles rouges et filets de morue et d'églefin ; et la désinfestation des légumes à cosse, arachides, fruits secs, papayas, blé et produits moulus.

La salle de traitement utilisée pour l'irradiation des aliments est tapissée de murs de plomb ou de béton épais pour empêcher le rayonnement de s'échapper. La source d'énergie, comme un élément radioactif ou une source d'électrons de machine, se trouve à l'intérieur de la pièce (les éléments radioactifs comme le ^{60}Co sont contenus dans des tubes en acier inoxydable. Parce qu'un isotope ne peut pas être mis en marche ou arrêté, lorsqu'il n'est pas utilisé, il est descendu dans un grand réservoir d'eau.) Avant le traitement d'irradiation, le personnel quitte la salle. Les aliments à irradier sont ensuite transportés à distance dans la pièce et exposés à la source de rayonnement pendant une durée prédéterminée. Le temps d'exposition et la distance entre la source de rayonnement et la matière alimentaire déterminent le traitement par

irradiation. Après le traitement, les aliments irradiés sont transportés hors de la pièce et l'élément radioactif est à nouveau abaissé dans le réservoir d'eau.

Des études à grande échelle menées dans le monde entier ont conclu que l'irradiation ne provoque pas de réactions nocives dans les aliments. En 1980, un comité mixte de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a déclaré qu'une dose moyenne globale de rayonnement de 10 kg était sûre pour les produits alimentaires. L'énergie maximale émise par le ^{60}Co et le ^{137}Cs est trop faible pour induire la radioactivité dans les aliments. Le rendement énergétique des générateurs de faisceaux d'électrons est soigneusement régulé et les rendements énergétiques recommandés sont trop faibles pour causer de la radioactivité dans les aliments.

Emballage

Parce que l'emballage aide à contrôler l'environnement immédiat d'un produit alimentaire, il est utile pour créer des conditions qui prolongent la durée de conservation d'un aliment. Les matériaux d'emballage couramment utilisés pour les aliments peuvent être classés comme flexibles (papier, stratifiés minces et film plastique), semi-rigides (papier d'aluminium, stratifiés, carton et plastique thermoformé) et rigides (métal, verre et plastique épais). Les matières plastiques sont largement utilisées dans l'emballage alimentaire parce qu'elles sont relativement bon marché, légères et faciles à mettre en forme.

La perméabilité sélective des matériaux à base de polymères aux gaz, tels que le dioxyde de carbone et l'oxygène, ainsi qu'à la lumière et à l'humidité, a conduit au développement des emballages à atmosphère modifiée. Si les propriétés barrières sont soigneusement sélectionnées, un matériau d'emballage peut maintenir une atmosphère modifiée à l'intérieur de l'emballage et prolonger ainsi la durée de conservation du produit alimentaire.

Les aliments déshydratés doivent être protégés de l'humidité pendant l'entreposage. Les matériaux d'emballage tels que le chlorure de polyvinyle, le chlorure de polyvinylidène et

le polypropylène offrent une faible perméabilité à l'humidité. De même, les matériaux d'emballage à faible perméabilité aux gaz sont utilisés pour les aliments gras afin de minimiser les réactions d'oxydation. Parce que les fruits et légumes frais respirent, ils ont besoin de matériaux d'emballage, comme le polyéthylène, qui sont très perméables aux gaz.

Les emballages intelligents offrent des propriétés qui répondent aux besoins particuliers de certains aliments. Par exemple, les emballages fabriqués avec des matériaux absorbant l'oxygène retirent l'oxygène de l'intérieur de l'emballage, protégeant ainsi les produits sensibles à l'oxygène de l'oxydation. Les films sensibles à la température présentent un changement brusque de perméabilité aux gaz lorsqu'ils sont soumis à une température supérieure ou inférieure à une constante définie. Ces films passent d'une structure cristalline à une structure amorphe à une température fixe, ce qui modifie considérablement la perméabilité aux gaz.

Stockage

L'entreposage des aliments est un élément important de la conservation des aliments. De nombreuses réactions qui peuvent détériorer la qualité d'un produit alimentaire se produisent pendant l'entreposage. La teneur en éléments nutritifs des aliments peut être affectée par un entreposage inadéquat. Par exemple, une quantité importante de vitamine C et de thiamine peut être perdue dans les aliments pendant l'entreposage. Parmi les autres changements de qualité indésirables qui peuvent survenir pendant l'entreposage, mentionnons les changements de couleur, le développement de saveurs étrangères et la perte de texture. Un système d'entreposage des aliments bien conçu permet d'entreposer les aliments frais ou transformés pendant une longue période tout en maintenant la qualité.

Le paramètre de stockage le plus important est la température. La plupart des aliments bénéficient d'un stockage à une température basse et constante où le taux de la plupart des réactions diminue et les pertes de qualité sont réduites au minimum. En outre, les aliments contenant de fortes concentrations d'eau doivent être entreposés dans des milieux très humides afin d'éviter la perte excessive d'humidité.

Un contrôle attentif des gaz atmosphériques, tels que l'oxygène, le dioxyde de carbone et l'éthylène, est important pour prolonger la durée de stockage de nombreux produits. Par exemple, aux États-Unis et au Canada, l'industrie de la pomme utilise des installations d'entreposage à atmosphère contrôlée afin de préserver la qualité des fruits. L'utilisation d'atmosphères contrôlées pour augmenter la durée de conservation des fruits a été démontrée pour la première fois en 1819 par Jacques-Étienne Berard, professeur à l'École de pharmacie de Montpellier, Fr. Le développement commercial de cette technique a eu lieu plus de 100 ans plus tard avec le travail pionnier de Franklin Kidd et Cyril West à la Station de recherche à basse température de Cambridge, Eng.

Norman Wilfred Desrosier

Ancien directeur de recherche, National Biscuit Company, New York City. Auteur de «The Technology of Food Preservation».

R. Paul Singh

Professeur de génie alimentaire, Université de Californie, Davis. Coauteur de «Introduction à l'ingénierie alimentaire».