

Conservation des aliments

1 L'altération des aliments

De tout temps l'homme a cherché à lutter contre l'altération des denrées alimentaires de base, pour des raisons vitales d'abord: nécessité de conserver le plus longtemps possible des denrées périssables, mais aussi sociologiques dues au regroupement des populations dans les cités. Plus tard ce sont ajoutées des raisons psychologiques: désir de consommer des denrées de plus en plus variées, pendant des périodes de plus en plus longues dans l'année. Puis est arrivée la mode des plats tout préparés.

L'altération des aliments peut être :

1.1. : une dégradation due aux réactions chimiques

Les plus fréquentes :

- brunissement non enzymatique : c'est l'apparition d'une couleur brun/caramel qui est difficilement mesurable dans la plupart des cas car instable. C'est la réaction de Maillard. Mécanisme qui passe par un intermédiaire (base de Schiff à partir des cétones, aldéhydes ou composés carbonylés)
- dénaturation des macromolécules azotées (protéines, acides nucléiques)
- modification physicochimique des grains d'amidon par éclatement quand la température augmente, suivie d'empesage (réalisation d'un empois) dont l'intensité est fonction de l'eau du milieu
- oxydation enzymatique par O₂ de l'air surtout les acides gras insaturés et de certaines vitamines

1.2. des altérations physicochimiques

- déstabilisation des émulsions
- déstabilisation des gels
- synérèse de liquides à partir des gels avec rétraction de la phase formée plus visqueuse = contraction de gel avec exsudation de liquide
- précipitation ou floculation dans les liquides
- recristallisation des phases normalement fluides

1.3. des altérations enzymatiques

Elles se produisent entre +15 et +50°C. Il s'agit en général de réactions d'hydrolyse et d'oxydation par les enzymes propres au produit ou exogènes, apportées par les micro-organismes

1.4. facteurs extérieurs intervenant dans l'altération

- la durée : La réglementation rend obligatoire la mention de la date de limite de consommation (DLC) pour les produits où la multiplication microbienne est possible et la date limite d'utilisation optimale (DLUO) pour les produits stables dans lesquels les propriétés organoleptiques et nutritionnelles subissent une dégradation lors de longs stockages.

- la température : c'est le facteur essentiel qui agit sur les causes d'altération
- l'hydratation, activité de l'eau : un produit à $AW < 0,60$ se stocke plus facilement
- le pH: il influence les activités enzymatiques et la vie microbienne (un pH acide $< 4,5$ est favorable à la conservation)
- la composition gazeuse de l'atmosphère (teneur en gaz et oxygène): le gaz conditionne le stockage en intervenant sur les réactions d'oxydation enzymatiques et non enzymatiques et d'autre part sur l'orientation et l'intensité du métabolisme cellulaire végétal ou microbien évoluant soit en aérobiose, soit en anaérobiose.
- l'intensité lumineuse: elle modifie des composants comme les vitamines, pigments, lipides,

Des facteurs ont donc été mis au point pour améliorer les qualités d'aliments et préservation des altérations

2 classification des technologies de modes de conservation

2.1. : procédés physiques qui inhibent ou détruisent les agents biologiques d'altération des aliments:

- le froid: réfrigération et congélation
- la chaleur: pasteurisation, stérilisation, conservation à température $> 63^{\circ}\text{C}$ de plats préparés à l'avance le jour de leur consommation
- destruction ou élimination des micro-organismes: ionisation, hautes pressions, champs électriques pulsés, filtration sur membrane (petite porosité)
- abaissement de l'activité de l'eau: concentration, séchage, déshydratation, filtration sur membrane (très petite porosité), incorporation de solutés (confisage, salaison)

2.2. : procédés chimiques : par additifs chimiques de conservation, production par fermentation de métabolites protecteurs

2.3. : contrôle de l'atmosphère

3 les techniques du froid

Le froid est apparu de tout temps comme un moyen de conserver les denrées alimentaires périssables. Les constructions anciennes montrent des emplacements réservés au stockage de la glace recueillie sur les rivières ou les lacs gelés. C'est à partir du XIXe siècle que l'ingénieur Le Tellier crée les premières machines technologiques du froid (1908). Actuellement la réfrigération est considérée comme un moyen normal de conservation, aussi bien au niveau familial que collectif. Les températures sont basses et proches de 0°C mais toujours positives, on parle alors de froid positif.

3.1. : la réfrigération, généralités :

Elle est utilisée à tous les stades de la production, de la fabrication, du transport, de la commercialisation des denrées périssables. La température est adaptée à la denrée alimentaire, à son évolution interne après l'abattage, la pêche ou la récolte et à la flore microbienne qui la contamine. Le froid diminue l'activité enzymatique.

Les cellules végétales restent en vie après la récolte, pendant un temps plus ou moins long suivant l'espèce, donc respirent et subissent des modifications touchant leurs propriétés organoleptiques et nutritionnelles. La flore microbienne associée évolue en fonction de la zone de température qui lui est optimale, ou qu'elle supporte et en fonction du pH du milieu. Le froid diminue le métabolisme cellulaire et inhibe ou ralentit le développement de la flore microbienne. La réfrigération est alors un moyen limité, le temps d'application doit être adapté au végétal.

Les cellules animales de la viande ou des produits de la pêche peuvent être considérés comme mortes peu après l'abattage de l'animal. Elles subissent rapidement l'action des enzymes catabolisantes. Le froid diminue et retarde cette maturation. Avec un certain ralentissement il permet les phénomènes biochimiques conduisant à la rigidité cadavérique puis à la maturation qui développe un pH de 5,7 à 5,9 et les qualités organoleptiques de la viande. Il bloque la putréfaction profonde liés aux germes aérobie mais les germes psychrotrophes se développent au bout de quelques jours et sont à l'origine d'un enduit visqueux à la surface de la viande puis de sa putréfaction superficielle. Le froid limite la flore psychrophile des poissons. De pH 6,5 à 6,7 et de texture fragile, ceux-ci subissent plus rapidement la dégradation microbienne malgré la réfrigération dans la glace pilée appliquée aux navires de pêche et de la vente au détail. La glace utilisée doit répondre aux critères de potabilité et de pureté règlementaires.

3.2. : l'action du froid positif

Le froid ne détruit pas les toxines ni les micro-organismes éventuellement contenus dans les aliments mais il peut limiter leur développement.

3.3. : les applications du froid en complément d'autres technologies :

- le conditionnement d'aliments réfrigérés sous atmosphère modifiée ou contrôlée : l'emballage sous vide supprime l'oxygène agent d'altération. L'azote, le CO₂ ou parfois l'O₂ sous faible pression utilisés pour le conditionnement sous atmosphère modifiée, en remplaçant l'air, agissent sur le produit et sur les micro-organismes. La matière première doit être de grande qualité bactériologique, avoir été traitée dans des conditions d'hygiène strictes pendant la préparation du produit et le matériau d'emballage doit être adapté. Les effets des gaz sont les suivants :
- ❖ L'azote est inerte, inodore, peu soluble dans l'eau et les lipides. Il remplace l'air dans l'emballage en évitant la rétractation inesthétique de celui-ci et protège le produit emballé des chocs
- ❖ Le CO₂ est très soluble dans l'eau et les lipides et de ce fait, il évite moins la rétraction de l'emballage que l'azote. Il est efficace à des teneurs supérieures à 20% dans l'atmosphère et à basse température. Le CO₂ se dissout mieux dans la phase aqueuse de l'aliment quand la température s'abaisse. Si le pH acide créé par le CO₂ est inhibiteur de la plupart des bactéries, il est surtout inhibiteur des enzymes bactériennes de la respiration. Le CO₂ inhibe une grande partie des bactéries Gram- telles que *Pseudomonas* et un grand nombre de bactéries psychrotrophes. Il y a souvent remplacement par des bactéries Gram+ anaérobies strictes ou facultatives tels les lactobacilles. Le CO₂ inhibe les moisissures. Les levures présentent une grande résistance sinon une insensibilité au CO₂.
- ❖ L'O₂ est un agent d'altération mais sa présence dans un mélange gazeux est souhaitable et même nécessaire dans le conditionnement des viandes pour maintenir la couleur rouge de la myoglobine et des produits de la mer.

- les produits alimentaires réfrigérés prêts à consommer

Certaines denrées alimentaires d'origine végétale ou animale périssables, conditionnées en récipients étanches aux liquides ont subi en vue d'assurer une conservation limitée un ou plusieurs traitements autorisés : pasteurisation par la chaleur, salage, séchage, déshydratation, fumage, marinage, addition d'agents conservateurs. Un $\text{pH} < 4,5$ favorise la conservation puisqu'il inhibe les germes responsables de toxi-infection.

3.4. : la congélation :

L'efficacité de la congélation est due au froid et à la réduction de l'activité de l'eau prise en glace dans le substrat. L'eau n'étant plus disponible comme solvant des composés cellulaires et comme réactif, la diffusion des constituants n'est pas possible et de ce fait, les réactions enzymatiques sont bloquées.

L'activité des enzymes est bloquée sauf celle des lipases (à -25°C) et de certaines enzymes des végétaux: chlorophyllases (transforme la chlorophylle en chlorophyllide et phytol), ascorbate oxydase (transforme l'acide ascorbique en dihydroascorbique, potentiellement toxique), phénolases (oxyde les composés phénol), peroxydases (décompose les peroxydes en dérivés toxiques de l'oxygène tels que H_2O_2).

Les cysticerques (forme larvaire cad vésicule de $10\mu\text{m}$ capable de se retrousser pour s'accrocher aux parois intestinales) des ténias sont détruits à -7°C . La congélation, maintenue pendant une dizaine de jours à température égale ou inférieure à -10°C est utilisée pour assainir les viandes parasitées par le ténia. Il faut trente jours à -15°C pour détruire les larves de trichines (ver de 1mm de long parasite de l'homme et des animaux qui se fixe sur les muscles ; contamination par la viande mal cuite d'animaux contaminés)

3.5. : les étapes de la congélation :

- la précongélation est l'étape qui consiste à amener le produit de la température originelle à la température de la cristallisation commençante de l'eau.

- la congélation correspond à la nucléation de la glace et à la croissance des cristaux. Elle fait suite à un court moment de surfusion où l'eau reste liquide à une température inférieure à son point de fusion. La température est sensiblement constante, l'énergie étant mobilisée pour transformer la plus grande partie de l'eau en glace. La congélation se poursuit pendant le refroidissement jusqu'à la température d'entreposage.

- le refroidissement

La vitesse de congélation est fonction de la différence de température entre le produit à congeler et le milieu réfrigérant. Si la vitesse d'extraction de chaleur est faible, le franchissement de la zone de cristallisation est lent, les cristaux seront peu nombreux et de grande taille. La congélation lente induit deux types de cristallisation

- ❖ une cristallisation extracellulaire qui se fait la première et qui se limite aux espaces inter et péricellulaires parce que la concentration en substances dissoutes y est plus faible que dans les cellules. Au fur et à mesure que l'eau gèle, la concentration des liquides extracellulaires s'élève, l'eau va donc sortir des cellules qui peu à peu se plasmolysent
- ❖ une cristallisation intracellulaire qui se fait à une température plus basse. Elle est brutale et fait suite au phénomène de surfusion dans la cellule.

Une congélation rapide provoque l'apparition de nombreux cristaux plus petits, extra et intracellulaires. Dans la congélation ultrarapide, tout le tissu subit la cristallisation, les cristaux, petits, ne sont pas visibles au microscope. La cellule ne change pas d'aspect et

semble « vitrifiée » à l'observation en lumière polarisée. Ceci n'est possible que si l'aliment à congeler est de petite taille et offre une grande surface pour une faible épaisseur, l'ambiance est maintenue à très basse température ou le bain réfrigérant a un contact excellent avec la denrée.

3.6. : conséquences de la congélation sur les aliments :

- modifications physicochimiques : elles sont liées au changement de phase eau-> glace qui peut avoir lieu pendant la congélation, la décongélation et pendant l'entreposage à l'état congelé. Il y a agrandissement des plus gros cristaux au détriment des plus petits qui disparaissent. Ce phénomène est favorisé par une température de stockage plus proche du point de fusion de l'eau.

- ❖ Augmentation de volume : l'eau augmente de 9% en volume lors de la congélation, les aliments un peu moins car toute l'eau n'est pas congelée ; cependant cette augmentation peut créer des lésions au niveau des structures tissulaires.
- ❖ Déshydratation des tissus : elle est plus marquée pour les végétaux avec plasmolyse possible des cellules. Cette déshydratation par sublimation de l'eau (passage de la glace à l'état de vapeur) peut créer en surface des traces, appelées brûlures par le froid.
- ❖ Augmentation de la concentration saline des solutions : au cours de la congélation, se produit une concentration globale du milieu interne liée à la prise en masse de l'eau. Il en résulte une augmentation de la force ionique avec
 - Possibilité de dénaturation des protéines membranaires, ce qui, du fait de l'activité de structure des cristaux de glace, se traduira au moment de la décongélation, par une exsudation composée d'eau et de substances hydrosolubles (composés azotés, sels minéraux, vitamines, pigments colorés et arômes, voire oses et diholosides)
 - Possibilité de dénaturation des protéines myofibrillaires des viandes, surtout des poissons avec perte de pouvoir de rétention d'eau à la décongélation ; les aliments apparaîtront secs à goût pailleux
 - Modification de structure des lipoprotéines du jaune d'œuf
 - Précipitation possible des sels minéraux, donc variation de pH qui ajoute encore à la dénaturation

- modifications biochimiques :

toutes les enzymes ne sont pas inhibées de la même façon par le froid, et l'activité prolongée de certaines peut produire divers métabolites, d'autant qu'il y a mise en contact anormal d'enzymes et de leur substrat.

3.7. : importance de la chaîne du froid :

L'Académie nationale de médecine souligne en 2000, après les cas de listériose en milieu familial :

- l'importance de la détermination régulière de la température du réfrigérateur par l'utilisation de mouchards sur les emballages dont la couleur vire à partir de +4°C, ceci de manière irréversible

- la nécessité d'équiper les réfrigérateurs neufs d'un thermomètre à lecture visible si possible à l'extérieur et d'un compartiment dont la température serait maintenue entre 0 et +4°C.

- la nécessité d'informer les consommateurs sur les règles d'utilisation du réfrigérateur dont :

- ❖ limiter le temps de transport entre la vitrine réfrigérée et le réfrigérateur
- ❖ éviter les produits chauds
- ❖ éviter les surcharges
- ❖ répartir les produits en fonction de leur fragilité
- ❖ nettoyer régulièrement

- la nécessité d'intensifier les recherches en vue de la mise au point de dispositifs permettant de s'assurer que la chaîne du froid n'a pas été rompue. Les enquêtes montrent que le consommateur souhaite disposer de témoins visibles du type de pastille fraîcheur, simple, fiable, et de coût modique

3.8. : moyens de contrôle de la chaîne du froid :

Les moyens disponibles sont :

- les timbres encrés qui changent de couleur à diverses températures, ces changements sont réversibles
- les indicateurs appliqués à la surface du produit à surveiller basés sur la fusion d'un réactif et sa diffusion au-dessous d'une température précisée, d'autres mesurent le changement de pH ou de couleur d'un substrat lipidique en présence d'une lipase activée au-delà d'une certaine température. Certains réactifs sont basés sur l'utilisation d'un monomère de diacétylène incolore qui se polymérise en donnant un composé noir, en fonction du temps et de la température du produit. En modifiant les radicaux portés par le monomère, on peut obtenir une gamme d'indicateurs.

4 conservation par la chaleur

4.1. pasteurisation et stérilisation

La pasteurisation est un traitement thermique moins sévère que la stérilisation. Elle est réalisée à des températures inférieures à 100°C alors que la stérilisation est réalisée à 100 et 150°C, le plus souvent au-dessus de 115°C de manière à obtenir une destruction complète de la flore microbienne.

Les couples temps-température sont déterminés en fonction des effets recherchés.

La pasteurisation a pour but de détruire sélectivement la flore microbienne présente (tableau).

La pasteurisation est un procédé de conservation limité auquel sont adjoints un conditionnement clos hermétiquement, associé ou non à une atmosphère modifiée ou sous vide, et une réfrigération. Pour certains aliments, des conservateurs chimiques (acide, sucre, sel, nitrate et/ou nitriques, acide sorbique,...) sont utilisés. La pasteurisation est utilisée quand

- un chauffage sévère dégrade les qualités organoleptiques de l'aliment (jambon, foie gras, plats cuisinés sous vide, ...)
- on recherche la dégradation de micro-organismes pathogènes (lait)

- on recherche la dégradation de genres, ou même espèces de micro-organismes concurrents de la fermentation recherchée (laits fermentés)
- le pH du produit est assez bas pour inhiber la prolifération des micro-organismes thermorésistants (fruits et jus de fruits)

4.2. : la stérilisation en vrac :

Le principal procédé de stérilisation en vrac est le procédé dit à ultra-haute température (UHT)

4.3. : l'appertisation

Nicolas Appert au début du XIXe siècle révéla au public les résultats de ses recherches concernant les conserves d'aliments en bouteilles. En 1815 (campagne de Russie) il remplaça les bouteilles de verre par des boîtes en fer blanc et utilisa des marmites autoclaves au lieu du bain-marie. En 1860 Pasteur expliqua le procédé utilisé par Nicolas Appert : la destruction de micro-organismes par la chaleur. NB : L'appertisation est une méthode particulière de conservation/stérilisation par la chaleur de denrées en récipients. Les produits obtenus sont généralement dénommés conserve.

Sont considérés comme conserves, d'après le décret du 10 février 1955, les denrées périssables, d'origine végétale ou animale, dont la conservation est assurée par l'emploi combiné de deux techniques suivantes :

- conditionnement dans un récipient étanche aux liquides, aux gaz et aux micro-organismes à toute température inférieure à 55°C
- traitement par la chaleur pour l'appertisation ou par tout autre mode autorisé. Ce traitement doit avoir pour but de détruire ou d'inhiber totalement, d'une part les enzymes, d'autre part les micro-organismes et leurs toxines, dont la présence ou la prolifération pourrait altérer la denrée considérée ou la rendre impropre à l'alimentation humaine.

Trois matériaux sont utilisés pour conditionner les conserves appertisées : verre, métal, (fer blanc, aluminium) et depuis peu les matières plastiques résistant à l'autoclavage

Le verre est de grande inertie mais sa transparence peut provoquer les pertes de vitamines photosensibles et la décoloration de certains pigments

Le fer apporte une grande résistance mécanique. En France le fer blanc représente 80% des conserves. Le fer blanc est de l'acier laminé revêtu d'étain qui assure sa protection.

5 Conservation par la déshydratation des aliments

Suivant son intensité, la déshydratation des aliments peut servir à les concentrer, à être une méthode partielle de leur conservation ou les conserver.

La conservation des aliments par le séchage (ou la dessiccation) est un des plus anciens procédés de conservation. Actuellement d'autres avantages sont recherchés : facilité de transport (pour le lait), ou commodité d'utilisation (purée). Les opérations de concentration, séchage et lyophilisation ont pour but d'éliminer partiellement ou quasi totalement l'eau, ce qui abaisse l'activité de l'eau (A_w) de l'aliment. L'élimination partielle de l'eau peut être un moyen de conservation si d'autres facteurs favorables à celle-ci s'ajoutent, telle la teneur élevée en sel ou en sucre, qui diminue A_w . Les fruits

séchés (dits secs) qui contiennent moins de 30% d'eau et près de 70% de sucre et les laits concentrés sucrés (moins de 30% d'eau et près de 55% de sucre) en sont des exemples.

L'élimination quasi-totale de l'eau permet d'obtenir une conservation longue. Les produits déshydratés obtenus contiennent au maximum 5% d'eau. Les laits totalement déshydratés ou laits en poudre, en sont des exemples. Dans ces produits, l'eau libre mais aussi la plus grande partie de l'eau liée ont été éliminées. L'activité de l'eau est alors inférieure à 0,4.

Du fait de la très faible activité en eau, inférieure à 0,4, de l'aliment déshydraté, la croissance des micro-organismes est stoppée, l'activité enzymatique du milieu est fortement ralentie, de même que les réactions d'hydrolyse, le brunissement enzymatique et l'oxydation des lipides. Cependant les produits déshydratés ne sont pas stériles et toute réhydratation accidentelle sera néfaste voire dangereuse. Le conditionnement dans un matériau étanche à la vapeur d'eau est conseillé.

Certaines réactions se produisent en cours de déshydratation. Elles retentissent sur les qualités organoleptiques, nutritionnelles, ou même fonctionnelles des protéines que contient l'aliment. Ces réactions peuvent être : évaporation de substances aromatisantes volatiles, oxydation de pigments, brunissement enzymatique, dénaturation des protéines, gélatinisation des grains d'amidon, brunissement non enzymatique par réaction de certains acides aminés (tels lysine) avec divers composés carbonylés tels que les sucres réducteurs, vitamine C.

Il en résulte une moins bonne assimilation de la lysine, acide aminé essentiel et la formation de composés aromatisants plus ou moins souhaitables. L'oxydation des lipides et des pertes partielles de vitamines sensibles à l'oxydation (C et A) ou à la chaleur (B1) se produisent aussi. Cependant, une déshydratation bien conduite altère peu les propriétés nutritionnelles. Des analyses de laits écrémés totalement déshydratés montrent que la valeur biologique du lait est peu affectée et que les pertes de vitamines C et B1 sont respectivement de 30 et 10%. Les pertes en vitamines sont moins importantes que lors de la stérilisation du lait en récipients.

Techniques de déshydratation des aliments ?

Principe général	technique		application
Par lyophilisation	Congélation suivie d'une déshydratation par sublimation (température basse et pression basse)		
Par concentration	Centrifugation Egouttage Pressage Ultrafiltration et centrifugation	Par Sédimentation forcée Par gravité Par pression Par tamisage moléculaire	Jus de tomate Fromage Fromage pressé Lactosérum, blanc d'oeuf
séchage	Essorage et centrifugation	tamisage	Cristaux de sucre à partir d'un sirop

La lyophilisation ou cryodessiccation est une technique de dessiccation de produits préalablement congelés.

Le procédé de séchage se fait en deux temps :

- l'eau congelée est éliminée par sublimation, la glace se transforme en vapeur d'eau : c'est la dessiccation primaire
- l'eau liée, non congelable, est éliminée par désorption sous vide : c'est la dessiccation secondaire par désorption isotherme

6 conservation par ionisation

L'ionisation utilise des rayonnements qui possèdent une énergie suffisante pour arracher un électron périphérique aux atomes de la matière traversée. C'est un procédé physique. Appliqué aux aliments, il augmente la durée de leur conservation et améliore la qualité hygiénique. Le premier brevet fut déposé en 1930. Après 1945, les biologistes disposaient de radioisotopes et d'accélérateurs d'électrons qui firent progresser la technique d'ionisation. 1976 fut une année clef : à l'issue de la conclusion des experts du Comité mixte OMS-FAO-IAEA (Agence internationale de l'énergie atomique) qui affirme l'innocuité des produits alimentaires traités par des doses inférieures à 10kGy, l'ionisation est autorisée sous certaines conditions de traitement. Mais en décembre 1997, le même comité considère que cette dose est dépassée. Le seuil des doses devient lié aux modifications organoleptiques. 1 Gy pour Gray = unité de dose de radioactivité (rayonnement ionisant) par unité de masse du corps considéré : 1J/kg = 1Gy

- Effets directs des radiations :

Plus la molécule a une structure spatiale complexe, avec un grand nombre de liaisons, plus elle est atteinte lorsque l'énergie du rayonnement s'élève. L'ADN présentant un grand nombre de liaisons peut être fortement affecté par l'ionisation. Plusieurs étapes existent dans l'altération : altération réparable par la cellule, rupture de l'ADN qui après recombinaison peut donner lieu à des cellules mutantes (utilisation de ce phénomène en horticulture par exemple), formation de ponts stables entre ou dans les hélices d'ADN, d'où le blocage de la réplication donc de la multiplication cellulaire, arrêt de la synthèse protéique et mort de la cellule.

Les effets seront donc fonction des doses d'ionisation. On note généralement la rupture de liaisons chimiques en fonction de leur stabilité, la production d'ions, mais aussi la possibilité de créer des atomes possédant un électron célibataire à l'origine des radicaux libres, si la dose utilisée dépasse certaines limites. Il faut des doses très élevées pour détruire les structures enzymatiques. Ces doses sont incompatibles avec la bonne qualité organoleptique de l'aliment. Si on veut détruire les enzymes pour permettre la conservation de certains aliments, il faut associer un traitement thermique au traitement ionisant appliqué. Si les virus sont détruits à dose très élevée (> 20kGy), bactéries et champignons microscopiques (levures et moisissures) sont sensibles à des doses supérieures à 1kGy. (cf tableau)

- les effets indirects des radiations :

L'apparition de nouveaux radicaux a un effet souvent plus important que les effets directs des radiations. La radiolyse de l'eau donne naissance à des dérivés fortement oxydants

qui bloquent les mécanismes d'oxydo-réduction dans les métabolismes ou même dans les enzymes intervenant dans ces métabolismes.

A une dose déterminée, se forment des espèces chimiques primaires qui sont en compétition. Plus le milieu est complexe, plus les effets compétitifs augmentent, limitant les effets de destruction des aliments.

- les effets sur les glucides :

Les glucides sont stables aux doses utilisées. Au-delà, l'amidon est dépolymérisé, des produits carbonylés à courte chaîne sont formés (aldéhydes, cétones, acides et sucres modifiés) et peu abondants, comme les produits formés par chauffage.

- les effets sur les protéines :

les ionisations provoquent des ruptures de ponts hydrogène mais la liaison peptidique est la plus stable, la molécule se déploie. Certains acides aminés peuvent être sensibles et subissent la décarboxylation et la désamination oxydative. Des produits de radiolyse (CO₂, H₂, NH₃, aldéhydes, acides organiques à courte chaîne) peuvent se former. Les acides aminés soufrés donnent de mauvaises odeurs au-delà de 10kGy. A des doses inférieures, la composition est peu affectée, donc la valeur biologique peu diminuée et les modifications de structure protéique sont proches de celles dues au traitement par la chaleur ou la congélation. Les protéines fibreuses sont les plus sensibles. La viscosité ou la solubilité des protéines sont modifiées autour de 10kGy. Les enzymes ne sont pas affectées aux doses couramment employées. De ce fait, le traitement par radirisation permet de diminuer la charge microbienne des préparations qui les contiennent en vue de leur utilisation comme auxiliaires technologiques.

- les effets sur les lipides :

la modification des lipides jusqu'à 20kGy est faible. Mais les acides gras polyinsaturés s'oxydent lors de l'ionisation en présence d'oxygène et des modifications organoleptiques négatives peuvent avoir lieu avec l'apparition d'un goût rance. Pour pallier ces désavantages, on couple l'ionisation, d'une part à l'emballage sous vide à l'abri de la lumière, d'autre part à l'adjonction de tocophérols ou d'acide L ascorbique. La congélation qui empêche la migration des produits de radiolyse, semble aussi donner de bons résultats. L'ionisation reste donc un procédé limité pour les produits laitiers, riches en lipides.

- les effets sur les vitamines :

la sensibilité aux rayonnements est fonction de la nature de la vitamine et du produit alimentaire. Par exemple, une partie de l'acide ascorbique est transformée en acide déhydroascorbique, biologiquement actif.

Les vitamines B1, B12, C, A, E, K semblent les plus fragiles. Les vitamines B6 et PP, carotène sont moins sensibles au traitement. Des interactions vitaminiques sont susceptibles de réduire les pertes et certaines précautions de les limiter : diminution de l'oxygène, traitement à l'abri de la lumière, addition d'accepteurs de radicaux oxydants tels que l'acide L ascorbique, les phénols...

- l'ionisation comme procédé de conservation des denrées alimentaires :

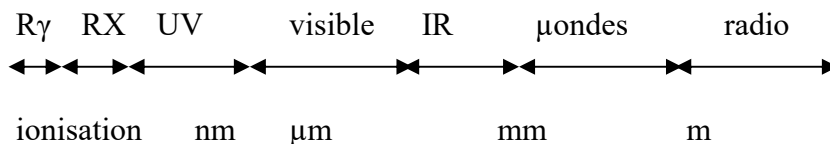
les investissements sont lourds, ce procédé est coûteux, donc son utilisation reste limitée. Le tableau présente les ionisations des denrées et les procédés de conservation habituels que peut remplacer l'ionisation.

7 conservation par les micro-ondes

Le blanchiment à l'eau ou à la vapeur entraîne des surcuissons de surface et des pertes importantes des nutriments hydrosolubles. Le traitement aux UHF (ultra hautes fréquences) réalisé sur les fruits épluchés donne de très bons résultats (à court terme et après entreposage) : il inactive les enzymes et conserve les propriétés organoleptiques et nutritionnelles (il n'y a pas de pertes par diffusion). Mais les polyphénolases résistantes et en très grande quantité dans la peau, si elle est conservée, ne sont pas détruites, l'air ambiant refroidissant la périphérie. On envisage de joindre aux UHF un autre procédé, les infrarouges par exemple.

8 conservation par pasteurisation aux infrarouges

Le rayonnement aux infrarouges (IR) est un rayonnement électromagnétique dont le spectre se situe en-dessous de $1000\mu\text{m}$. Les applications industrielles utilisent un spectre de $0,76$ à $10\mu\text{m}$.



Le rendement de l'énergie est de 90% pour les IR de 4 à $10\mu\text{m}$ et 70% pour les IR courts de $0,76$ à $2\mu\text{m}$, plus pénétrants et convenant mieux aux produits épais. Quand l'aliment absorbe le rayonnement IR, il subit une agitation moléculaire et s'échauffe : lorsque l'onde électromagnétique frappe la molécule, il y a augmentation des vibrations moléculaires puis l'énergie mécanique est restituée sous forme de chaleur lorsque la molécule tend à revenir à son état vibratoire initial. Les molécules d'eau, les groupes fonctionnels des molécules organiques des aliments présentent des vibrations moléculaires très importantes.

De nombreuses applications existent et sont en voie de développement dans les industries agro-alimentaires, telles la pasteurisation de dérivés laitiers, lait, crème, jus de fruits, la stérilisation des dérivés céréaliers préemballés : viennoiseries, produits de biscuiterie et pâtisserie.

Les traitements thermiques de surface tels que braisage, dorage, gratinage, ayant pour but d'améliorer les qualités organoleptiques (aspect, saveurs) se font en IR moyens ; le traitement est court et s'intègre en continu dans une chaîne de fabrication.

Les IR sont aussi utilisés pour la torréfaction des grains et le séchage préliminaire de certains produits céréaliers. Les IR sont des traitements d'utilisation facile, performants, appelés à une application croissante compte-tenu de l'évolution des produits céréaliers et des plats cuisinés auxquels ils confèrent de meilleures qualités organoleptiques associées à une garantie hygiénique.

9 conservation par les champs électriques pulsés

Cette technique peut être utilisée pour pasteuriser en détruisant les formes végétatives des micro-organismes dans les liquides alimentaires (lait, œufs liquides) augmentant leur durée de vie et les rendant plus sains.

L'application des champs électriques très intenses (supérieurs à 10kV cm^{-1}) à une membrane cellulaire induit une différence de potentiel électrique telle qu'elle entraîne la formation de pores dans la membrane suite au phénomène de répulsion créé entre les molécules chargées. La sortie du contenu cellulaire se fait alors, entraînant même la mort de la cellule. L'intensité du champ électrique requise pour la formation des pores cellulaires est inversement proportionnelle au diamètre de la cellule.

Cette technique n'est pas efficace pour détruire les spores et ne peut donc servir à la stérilisation. Les produits alimentaires liquides sont traités par passage en champs électriques pulsés, quelques secondes seulement. Cette technique ne crée pas de modifications organoleptiques (les arômes sont préservés), elle conserve les qualités nutritionnelles (les vitamines ne sont pas dénaturées) et préserve l'activité enzymatique.

Les micro-ondes et les ultra-hautes fréquences

Les micro-ondes sont obtenues par conversion d'énergie électrique en ondes électromagnétiques. Les micro-ondes ou ultra-hautes fréquences (UHF) sont de sondes électromagnétiques de fréquences de 300MHz à $100 \cdot 10^6$ MHz soit de longueur d'onde de 1m à 0,003m.

Tableau

Les MO formées réfléchies par les métaux pénètrent de façon pratiquement instantanée dans les aliments non conducteurs. L'aliment placé dans le champ électromagnétique alternatif absorbe les MO et s'échauffe du fait des frictions moléculaires dues aux oscillations des molécules dipolaires qu'il contient.

Certaines molécules sont polaires (l'eau) d'autres se polarisent sous l'effet de champ électrique appliqué comme une aiguille aimantée s'oriente dans un champ magnétique. Si le champ vibre à une certaine fréquence, les molécules tentent de suivre cette vibration. Le champ électromagnétique alternatif porté induit des vibrations des molécules polaires qui sont fonction de la fréquence des ondes : d'où la création de chaleur due à l'agitation des dipôles. La puissance dissipée sous forme de chaleur dans un corps soumis à un rayonnement micro-ondes est :

- proportionnelle à la constante diélectrique ou permittivité du corps. On appelle constante diélectrique la constante introduite dans le calcul des forces d'attraction s'exerçant entre les corps électrisés caractérisant l'aptitude de ce corps à être polarisé, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle un champ électrique donne une orientation aux dipôles moléculaires au cœur de la lumière.
- proportionnelle à son facteur de perte. Ce terme définit la quantité de chaleur produite par le déplacement alternatif des molécules polarisées sous l'effet du champ électrique alternatif du rayonnement incident.
- proportionnelle à la fréquence
- proportionnelle au carré du champ électrique, c'est à dire à la puissance à la source.

La profondeur de pénétration des MO est inversement proportionnelle au facteur de perte et à la fréquence. Dans le cas d'un matériau non polaire, il n'y a pas d'échauffement. C'est le cas du verre, du carton, des matières plastiques qui pourront servir de récipients culinaires pour les aliments à chauffer par les MO qui les traversent.

Par contre, une paroi métallique réfléchit les MO selon les lois de l'optique : angle d'incidence égal à l'angle de réflexion. Les parois métalliques du four à MO réfléchissent les ondes envoyées par un guide d'ondes sur l'aliment à chauffer. Le récipient ne doit pas être métallique, il réfléchirait les ondes au lieu de les transmettre à l'aliment qu'il contient.

Les propriétés diélectriques des produits sont fonction de la teneur en eau (plus l'aliment est pauvre en eau et en sel, plus les MO les pénètrent profondément), de l'état physicochimique de cette eau et de la température du produit.

Quand les tissus contiennent beaucoup d'eau, ils sont de bonnes propriétés diélectriques (aptitude à emmagasiner l'énergie électrique) et s'échauffent facilement sous l'action des MO. Les aliments contiennent une couche d'eau étroitement liée aux surfaces solides, puis des couches d'eau additionnelles présentant des niveaux d'énergie décroissants,

enfin des régions poreuses contenant l'eau libre ou faiblement liée, de haute propriété diélectrique aux UHF. Plus la teneur en eau de l'aliment est élevée, plus l'échauffement est rapide. L'état physicochimique de l'eau intervient : la glace crée peu de pertes diélectriques en UHF. La vitesse d'échauffement s'élève :

- lors de la présence des sels (l'eau distillée a toujours un facteur de pertes inférieur à celui des milieux alimentaires)
- lors de changement de phase : glace en eau (les pertes diélectriques des milieux alimentaires sont négligeables à des températures inférieures à -5°C . Le maximum de la valeur des pertes diélectriques s'inscrit entre -3° et $+5^{\circ}\text{C}$ puis elle chute jusqu'à atteindre une valeur diminuée du tiers à 20°C ; elle s'infléchit facilement au-delà de cette température)

La vitesse d'échauffement s'abaisse :

- en présence de corps gras solides ou liquides
- lorsque la température augmente

Beaucoup de facteurs influencent le chauffage par MO : la température de départ de l'aliment, sa taille, sa forme, sa masse, sa consistance, sa capacité thermique massique et ses propriétés diélectriques.

Les MO possèdent plus d'énergie à leur arrivée à la surface de l'aliment. La dissipation de l'énergie est un peu plus forte en surface qu'en profondeur de l'aliment. C'est donc à partir de la surface que l'aliment s'échauffe. Dans une enceinte l'ambiance reste froide. La vapeur d'eau qui se forme dans l'aliment tend à migrer vers la surface et peut la ramollir. Il ne se forme pas de « croûte » comme dans un four traditionnel où l'ambiance doit être portée à haute température (paroi, grille, air du four) ; cette ambiance plus chaude que l'aliment, créant des réactions de Maillard (brunissement non enzymatique), responsables de la couleur de l'aliment rôti, d'une partie de la saveur et de la baisse de la valeur biologique par complexation de certains acides aminés, surtout si le chauffage est long.

La cuisson par MO obéit à la loi générale : $W = m \cdot c_m \cdot \Delta T = P \cdot \Delta t$

W : énergie en joule

m : masse en kg

c_m : capacité massique (chaleur massique) en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

ΔT : élévation de température en K

P : puissance en watts

Δt : intervalle de temps en secondes

L'énergie mise en jeu est donc fonction de la teneur en eau du produit.