



UE : CHAINES DES VALEURS
ECUE : CONSERVATION DES PRODUITS
AGRICOLES

Equipe pédagogique

GUEDE Séri Serge : Maître de Conférences de Biochimie et Nutrition
Ingénieur des Industries Agro-alimentaires

KOUAME Maïmouna Liliane : Maître-Assistant de Biochimie et Microbiologie

NYAMIEN Yves Bléouh : Maître-Assistant de Biochimie et Sciences des
aliments

Année académique : 2024-2025

INTRODUCTION

1. Définition

La conservation est généralement définie comme une méthode utilisée pour préserver un état existant ou pour empêcher une altération susceptible d'être provoquée par des facteurs chimiques (oxydation, humidité), physiques (température, lumière) ou biologiques (microorganismes, insectes). La vitesse d'altération dépend des caractéristiques « intrinsèques » liées au produit agricole et aux conditions « extrinsèques » qui sont liées à l'environnement.

Les conditions intrinsèques et extrinsèques constituent des barrières (ou des obstacles) au développement des microorganismes ou aux mécanismes d'altération non microbienne. Les techniques de conservation des produits agricoles reposent sur l'exploitation de ce principe des barrières pour préserver la qualité et la sécurité des denrées agricoles.

2. Différentes causes d'altération des produits agricoles

Les produits végétaux, en particulier les fruits et les légumes, sont plus ou moins sensibles au stockage à l'état frais. Après leurs récoltes, le métabolisme des tissus végétaux reste actif (**Rappel cours de physiologie post-récolte**). Exposés à l'air à la température ambiante, tous les produits agricoles se détériorent lentement à moins d'être protégés. Ils sont sujets à quatre types d'altération.

1) **Physiques** : chocs, blessures, chaleur, humidité, sécheresse.

2) **Microbiologique** : dégradation par des Micro-organismes (M.O) (plus fréquent)

a/ **bactéries** :

- forme arrondie, en bâtonnet ou spiralée ;
- préfèrent les produits agricoles à faible acidité (ex. légumes) ;
- pour détruire les spores bactériennes, $T = 116^{\circ}\text{C}$.

b/ **levures**, causent la fermentation, une manifestation de leur métabolisme.

- Les vraies levures métabolisent le sucre en alcool et en gaz carbonique (fermentation);
- Les fausses levures se manifestent sous forme de pellicule sèche à la surface d'un produit agricole. On les trouve dans les denrées à teneur élevée en sucre ou en acide.

c/ **moisissures**, se développent en filaments qui forment une masse solide, visible. Elles produisent des spores qui, à l'état sec, flottent dans l'air, à la recherche de conditions favorables pour recommencer leur cycle de croissance.

* **Levures** et **moisissures** peuvent croître dans les produits agricoles fortement acides (fruits, tomates, etc.). Pour les détruire dans ces denrées, il faut appliquer $T = 100^{\circ}\text{C}$.

3) **Biochimique** : par des **Enzymes** :

- Protéines présentes dans tous les végétaux et animaux.
- Faciles à détruire par la chaleur.
- Les aliments crus doivent être utilisés quand ils sont frais, sinon les enzymes détériorent la couleur, la texture et la saveur.

4) **Chimique** : hydrolyse, oxydation, brunissement non enzymatique (BNE).

3. Différentes techniques de conservation

Les **techniques de conservation** des produits agricoles peuvent être classées en trois groupes : physique, physico-chimique ou microbiologique. Le premier groupe fait appel à des procédés physiques comme la température, la pression, l'irradiation ionisante et le champ électrique. Le deuxième groupe se base sur la modification des caractéristiques intrinsèque de l'aliment comme le pH, l'activité de l'eau ou l'incorporation d'additifs dans la denrée en vue de sa conservation. Le dernier groupe repose sur l'utilisation des microorganismes pour la modification des caractéristiques physico-chimiques du produit agricole ; la technique la plus connue est la fermentation. La combinaison de plusieurs techniques de conservation peut être également envisagée afin d'augmenter la durée de vie d'un produits agricole sans provoquer une modification significative de ses caractéristiques physico-chimiques.

Les différentes techniques de conservation présentées dans ce document sont :

- ✓ Conservation des aliments par le froid
- ✓ Conservation des aliments par traitement thermique
- ✓ Conservation des aliments par réduction de l'activité de l'eau
- ✓ Conservation des aliments par réduction du pH
- ✓ Conservation des aliments par fumaison
- ✓ Conservation des aliments par la maîtrise du potentiel d'oxydo-réduction
- ✓ Conservation des aliments par radiations ionisantes
- ✓ Conservation des aliments par hautes pressions
- ✓ Conservation des aliments par champ électrique
- ✓ Conservation des aliments par voie chimique
- ✓ Conservation des aliments par combinaison de plusieurs techniques

CHAP I. CONSERVATION PAR LE FROID

I.1. INTRODUCTION

L'utilisation du froid pour la conservation des aliments est sans conteste la technique la plus répandue. Les basses températures retardent le développement des micro-organismes, les réactions chimiques, métaboliques et enzymatiques qui entraînent la détérioration du produit. Les enzymes et les réactions chimiques sont considérablement ralenties à des températures basses ($<5^{\circ}\text{C}$), alors que la majorité des microorganismes ne sont plus capables d'activité métabolique à des températures inférieures à -5°C . Certains, tels que les bactéries coliformes, sont même inactivés.

La conservation par le froid doit être appliquée à un produit initialement sain (en bon état et frais), faite rapidement et le plus tôt possible après la récolte, et être continue tout au long de la filière de distribution (depuis la récolte jusqu'à la consommation).

On distingue deux procédés qui utilisent cette technique, la réfrigération et la congélation.

I.2. RÉFRIGÉRATION

La réfrigération consiste à entreposer les aliments à une température basse, proche du point de congélation, mais toujours positive par rapport à celui-ci. Généralement, la température de réfrigération se situe aux alentours de 0°C (entre 0 et 8°C). Elle est très utilisée et se développe avec l'apparition des produits élaborés, qui ont subi un traitement thermique modéré, nécessitant une conservation au froid.

La réfrigération conserve les aliments dans un état très voisin de leur état initial en ralentissant les réactions chimiques et enzymatiques et en retardant la multiplication des microorganismes. Elle freine les mécanismes de dégradation de la matière, vivante ou non, et le métabolisme cellulaire des organes vivants (activité respiratoire, croissance, maturation). Elle retarde la prolifération des populations microbiennes, mais ne détruit qu'un nombre limité de germes. Aussi, toute remontée de température, même de courte durée, entraîne une réactivation du développement des microorganismes.

La réfrigération est utilisée pour la conservation des aliments périssables à court et moyen terme. La durée de conservation est variable d'un produit à un autre. Elle va de quelques jours à plusieurs semaines suivant le produit, la température, l'humidité relative et le type de conditionnement. Le tableau I illustre quelques exemples ; mais il faut aussi tenir compte de la réglementation en ce domaine.

Tableau I : Durée de conservation de certains aliments par la réfrigération

Produit	Température de réfrigération recommandée	Humidité relative recommandée	Durée de stockage
Pommes	-1 à 5 °C	90 %	3 à 8 mois
Abricot	0 °C	90 %	1 à 2 semaines
Haricot vert	5 à 7 °C	90 à 95 %	7 à 10 jours
Melons	0 à 10 °C	85 à 90 %	5 jours à 6 semaines

Tableau II : Conditions de conservation des produits réfrigérés.

<i>Produits non ou très peu sensibles au froid</i>				<i>Produits moyennement sensibles au froid</i>			
Fruits	°C	a_w	DPC	Fruits	°C	a_w	DPC
abricot	0	0,90	2-4 s	mandarine	4 - 6	0,85-0,95	4-6 s
citron (coloré)	0 - 4,5	0,85-0,90	2-6 m	mangoustan	4 - 5,5	0,85-0,95	6-7 s
datte (fraîche)	0	0,85	1-2 m	pastèque	5 - 10	0,85-0,95	2-3 s
fraise	0	0,90-0,95	1-5 j	<i>Légumes</i>			
kiwi	-0,5	0,90-0,95	8-14 s	haricot vert	7 - 8	0,85-0,90	2-4 s
noix de coco	0	0,80-0,90	1-2 m	pomme de terre - (consommation)	4 - 6	0,90-0,95	4-8 m
orange (s.o.v.)	0 - 4	0,85 -0,90	3-4 m	- (industrie)	7 -10	0,90-0,95	2-5 m
pêche	0	0,90	2-4 s	<i>Produits très sensibles au froid</i>			
poire (s.o.v.)	0	0,90-0,95	2-5 m	Fruits	°C	a_w	DPC
pomme (s.o.v.)	0 - 4	0,90-0,95	2-4 s	ananas (vert)	10 -13	0,85-0,90	2-4 s
raisin (s.o.v.)	-1 - 0	0,90-0,95	1-4 m	ananas (mûr)	7 - 8	0,90	2-4 s
<i>Légumes</i>				avocat	7 -12	0,85-0,90	1-2 s
ail	0	0,65-0,70	6-7 m	banane (verte)	12 -13	0,85-0,90	10-20 j
carottes	0	0,95	5-6 m	banane (colorée)	13 - 16	0,85-0,90	5-10 j
céleri	0	0,95	4-12 s	citron vert (s.o.v.)	10 - 14	0,85-0,90	1-4 m
champignon	0	0,90-0,95	5-7 j	goyave	8 - 10	0,90	2-3 s
chou (s.o.v.)	0	0,95	1-3 m	lime	8,5 -10	0,85-0,90	3-6 s
chou-fleur (s.o.v.)	0	0,95	2-3 s	mangue (s.o.v.)	7 - 12	0,90	3-7 s
laitue	0	0,95	1-2 s	melon (s.o.v.)	7 - 10	0,85-0,90	1-12 s
maïs doux	0	0,95	1s	pamplemousse	10	0,85-0,90	2-3 m
navet	0	0,95	4-5 m	papaye	7 - 10		1-3 s
oignon (sec)	0	0,65-0,70	6-8 m	<i>Légumes</i>			
radis	0	0,90-0,95	1-2 s	aubergines	7 -10	0,90-0,95	10 j
pomme de terre (semence)	2 - 3	0,90-0,95	5-8 m	concombre (s.o.v.)	9 - 12	0,95	1-2 j
<i>produits animaux</i>				gingembre	13	0,85	6 m
abats	-1,5 - 0	0,85-0,95	7 j	gombo	7,5 - 10	0,90-0,95	1-2 s
agneau	-1,5 - 0	0,85-0,95	3-4 s	igname	16	0,85-0,90	3-5 s
beurre	0 - 4		2-4 s	patate douce	13 - 16	0,85-0,90	4-7 m
boeuf	-1,5 - 0	0,85-0,95	3-5 s	poivron doux	7 - 10	0,90-0,95	1-3 s
crème	-2 - 0		15 j	potim	10-13	0,50-0,75	2-5 m
crustacés	0		4-6 j	tomate (verte)	12 - 13	0,85-0,90	1-2 s
fromage	5		1-2 s	tomate (mûre)	8 - 10	0,85-0,90	1 s
fromage frais	0 - 2	0,85-0,90	2 m	<i>Abréviations:</i>			
fromage à pâte molle	0 - 5	0,85-0,90	2 m	a_w : activité de l'eau			
fromage dur	-1 - 1	0,70-0,75	12 m	DPC : Durée pratique de conservation			
lait (cru)	0 - 4		2 j	s.c. : suivant classe			
lait (pasteurisé)	4 - 6		7 j	s.o.v. : selon origine et variété			
oeufs (en coquille)	-1 - 0	0,90	6-7m	j : jour			
poisson (s.c.)	0		6-14 j	s : semaine			
porc	-1,5 - 0	0,85-0,95	3 s	m : mois			
veau	-1,5 - 0	0,85-0,95	3s				
viande hachée	4	0,85-0,95	1 j				
volailles éviscérées - non éviscérées	-1 - 0	0,85-0,95	3 s				
yacurt	2 - 5		2-3 s				

I.3. CONGÉLATION

La congélation consiste à entreposer les aliments à des températures inférieures au point de congélation, généralement -18°C . Elle est utilisée pour la conservation des aliments à long terme (4 à 24 mois).

L'eau cristallisée par congélation est liée et indisponible comme solvant et/ou réactif entraînant une réduction de A_w du produit. Par conséquent, l'activité métabolique de la plupart des cellules ou germes pathogènes et d'altération est inhibée. Cependant, les réactions d'altération chimique ne sont pas arrêtées complètement. Les plus importantes de ces réactions sont l'oxydation enzymatique des lipides, l'hydrolyse des glucides et la lipolyse. Pour en remédier, les industriels procèdent généralement à un blanchiment des produits (cas des légumes surgelées) avant leur congélation.

Remarque : le produit congelé doit être immédiatement consommé après décongélation ; car ce traitement ne détruit ni les enzymes, ni les microorganismes. Aussi, un aliment à congeler doit atteindre un stade de maturation qui permet la consommation.

I.3.1. Cinétique de congélation

La cinétique de congélation est caractérisée par trois phases (Figure 1). Pendant la première phase, la température du produit diminue rapidement puis se stabilise pendant un certain temps, qui correspond à la deuxième phase, à un niveau équivalent à celui de la formation de la glace. Ensuite, la température reprend sa descente jusqu'à atteindre la température finale désirée : c'est la troisième phase.

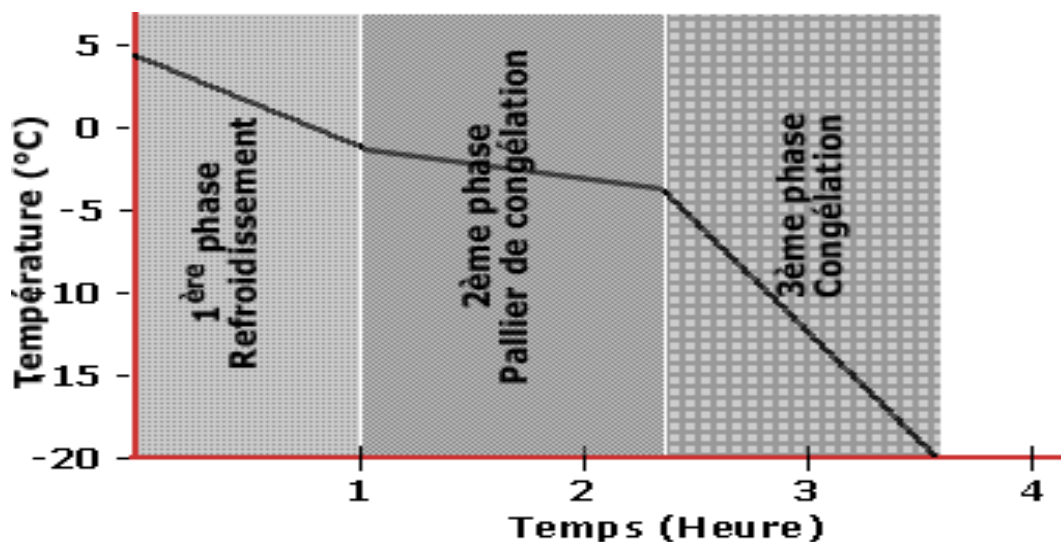


Figure 1 : Evolution de la température à cœur du produit pendant la congélation

Selon la vitesse de congélation des aliments, on distingue :

1. La **congélation rapide** ou **surgélation** : au cours de laquelle les denrées sont stabilisées par abaissement rapide (moins d'une heure) de la température jusqu'à -18°C à cœur. Cette technique permet la formation de nombreux et petits cristaux de glace qui ne détériorent pas la qualité de l'aliment. Seul un faible exsudat se produit lors de la décongélation, limitant les pertes de nutriments et de micronutriments.

2. La **congélation lente** qui s'applique à des produits qui, par leur aspect ou leur mode de récolte, ne peuvent satisfaire à certaines exigences, par exemple vitesse de congélation à laquelle sont soumis les produits surgelés. Le refroidissement de l'aliment s'effectue lentement ce qui entraîne la formation de cristaux de glace de taille relativement importante par rapport à celle des cellules du produit. Les aiguilles tranchantes des cristaux de glace peuvent percer et déchirer la paroi des cellules peu résistantes et favoriser une grande perte de substances solubles par exsudation lors de la décongélation.

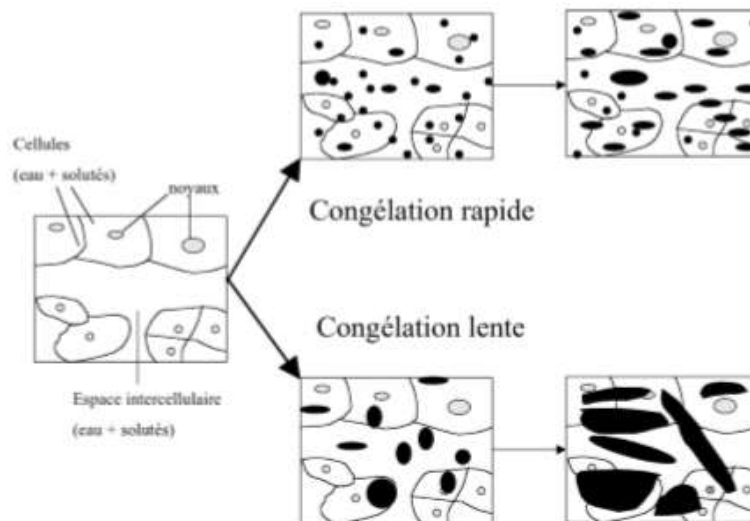


Figure 2 : Représentation schématique de la formation de micro-cristaux et puis de cristaux de glace pendant la congélation.

II.3.2. Techniques de congélation

Il existe divers procédés de congélation : par l'air ; par contact indirect ; par contact direct.

II.3.2.1. Congélation par l'air

a) Chambre de congélation :

Le produit est placé dans de l'air maintenu à -20 ou à -30°C . L'épaisseur du produit congelé est de l'ordre de $0,2$ cm/heure, cette technique est très peu employée.

b) Tunnel de congélation :

Le tunnel de **congélation** utilise l'air pulsé comme fluide frigorigène intermédiaire. Celui-ci est refroidi à travers l'évaporateur de la machine frigorifique, pulsée sur le produit par un ventilateur, puis recyclé pour être refroidi à nouveau.

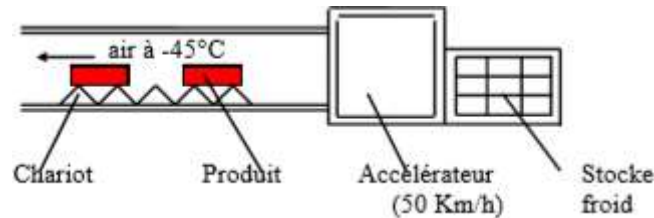


Figure 3 : Schéma d'un tunnel de congélation.

- C'est une congélation plus rapide de l'ordre de 3 cm/heure.
- La vitesse de l'air dans le tunnel peut atteindre 50 km/h.
- La durée moyenne de congélation est de 20 min.

Ce système existe en continu et en discontinu. L'avantage des tunnels de congélation réside dans leur souplesse d'utilisation. Ils sont recommandés lorsqu'on est amené à congeler plusieurs types de produits, de forme et de taille différente

c) Congélation à lit fluidisé :

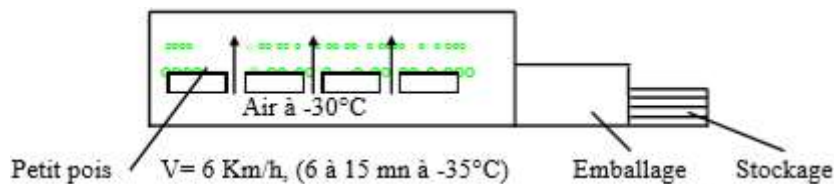


Figure 4 : Schéma d'un congélateur à lit fluidisé.

Lorsque le produit à congeler est constitué de petites particules n'excédant pas 15 cm d'épaisseur, il suffit de faire passer l'air froid de bas en haut à une vitesse linéaire > 6 km/h, les particules sont soulevées et agitées (fluidisé) ➡ La congélation est donc meilleure et rapide (6 à 15 min à -35°C). Ce mode est appelé aussi « **individuel Quick Freezing** » (IQF) c'est à dire **congélation rapide individuelle**.

I.3.2.2. Congélation par contact indirect :

Le produit emballé ou pas est congelé par contact avec une surface métallique maintenue froide par circulation d'un fluide réfrigérant (saumure, ammoniac, divers fréons, ...).

a) Congélateur à plaques :

Dans les **congélateurs à plaques**, le produit est refroidi au contact de la surface des plaques, à l'intérieure desquelles circule le fluide frigorigène. Ce type de congélateurs peut être à plaques

horizontales ou verticales selon que les plaques sont disposées horizontalement (sous forme d'étagères) ou verticalement.



Figure 5 : Schéma d'un congélateur à plaques.

La congélation d'un produit de 5 cm d'épaisseur exige 2 heures ou d'avantage s'il y a de l'air entre l'emballage et le produit.

b) Congélateur à tambour et tubulaire :

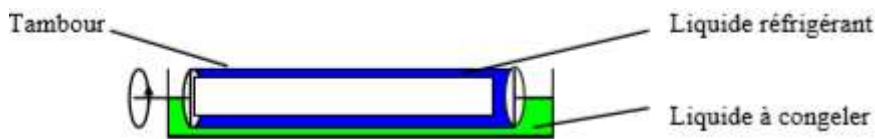


Figure 6 : Schéma d'un congélateur à tambour et à tubulaire

Dans le cas des produits liquides ou semi-pateux (purée, jus concentré, mélange pour crème glacé, etc.), la congélation est réalisée rapidement sous forme de couche mince. Le tambour dans lequel circule un liquide réfrigérant tourne selon l'axe horizontal, la partie inférieure passe dans le liquide à congeler et enlève une couche qui est récupérée selon un procédé automatisé.

I.3.2.3. Congélation par contact direct avec un fluide réfrigérant (autre que l'air) :

En raison du contact avec le produit, le liquide doit présenter diverses propriétés ;

- absence de toxicité, d'odeur et de saveur,
- faible pénétration dans l'aliment, faible réactivité et viscosité,
- capacité thermique élevée,
- faible corrosivité vis à vis de l'emballage.

a) Solution à bas point de congélation :

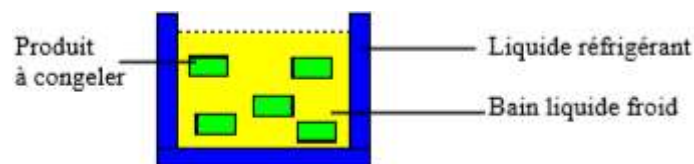


Figure 7 : Congélation avec une solution à bas point de congélation

L'aliment est congelé dans un bain liquide froid, lui-même réfrigéré par contact indirect avec un fluide réfrigérant, tel que l'ammoniac ou fréon.

b) Liquides cryogéniques à très bas point d'ébullition

La **congélation cryogénique** (ou **directe**) consiste à mettre le produit directement en contact avec une source de froid, par aspersion ou pulvérisation d'un liquide comme l'azote liquide ou le CO₂ liquide qui s'évaporent au contact du produit. Dans ce cas, l'apport frigorifique est apporté par la chaleur latente d'évaporation du liquide en contact avec le produit (l'azote liquide s'évapore à -196 °C et le CO₂ liquide s'évapore à -54 °C). Ce système de congélation a l'avantage d'être rapide et ne nécessitant pas une installation frigorifique proprement dite. Toutefois, il est assez coûteux et ne peut être donc utilisé que pour les produits alimentaires à haute valeur marchande.

Tableau III : Caractéristiques de quelques liquides cryogéniques.

	CO ₂		N ₂ O	Fréon 12	Fréon R 13	Fréon R 23	N ₂
Point d'ébullition à la pression atmosphérique en °C	-78,5		-89,5	-29,8	-81,4	-82,1	-195,8
Capacité calorifique (du point d'ébullition - ou de sublimation pour le CO ₂ solide - jusqu'à -29°C) en cal/g	Solide 147,6	Liquide 83,3	102,2	39,4	35,5	57,2	89,4

Fréon 12 : (ou réfrigérant 12 du Pont de Nemours) ;
CCl₂F₂. Fréon R13: Chlorotrifluorométhane. Fréon R23 : Trifluorométhane.

I.4. Recommandations d'utilisation des Réfrigérateurs et congélateurs

- ✓ Le réfrigérateur doit être réglé à 4 °C. Pour les aliments congelés, la température doit être de -18 °C ou moins.
- ✓ Nettoyer régulièrement le réfrigérateur et le congélateur afin d'éliminer les contaminations croisées dues aux aliments avariés
- ✓ Eviter d'encombrer le réfrigérateur et permettre à l'air de circuler librement entre les aliments pour leur bon refroidissement
- ✓ Eviter le stockage de produits alimentaires différents dans un même réfrigérateur ou congélateurs afin d'éviter les imprégnations d'odeurs.
- ✓ Emballer les aliments, en général humides, avec des matériaux hermétiques à l'eau et adhérent au produit pour éviter un rééquilibrage de l'activité de l'eau pendant la conservation au froid.

CHAP II. CONSERVATION PAR LA CHALEUR

II.1. INTRODUCTION

Le traitement des aliments par la chaleur (ou traitement thermique) est aujourd'hui la plus importante technique de conservation de longue durée. Il a pour objectif de détruire ou d'inhiber totalement ou partiellement les enzymes et les microorganismes, dont la présence ou la prolifération pourrait altérer la denrée considérée ou la rendre impropre à l'alimentation humaine. L'effet d'un traitement thermique est lié au couple temps/température. De manière générale, plus la température est élevée et plus la durée est longue, plus l'effet sera important. Cependant, il faut aussi tenir compte de la résistance thermique des micro-organismes et des enzymes et qui est très variable.

Selon l'objectif recherché, on distingue plusieurs techniques de conservation des aliments par traitement thermique comme la stérilisation, la pasteurisation, la cuisson et le blanchiment.

II.2. EFFICACITE DU TRAITEMENT THERMIQUE

La chaleur peut tuer les bactéries parce qu'elle inactive les enzymes et coagule les protéines de structure (dénaturation irréversible), et stoppe la réplication de l'ADN. L'efficacité d'un traitement thermique est fonction :

- de la thermorésistance de "la bactérie",
- du niveau de contamination initiale (nombre de bactéries à détruire),
- des conditions de milieu (pH, humidité, notamment),
- de la nature, du poids et du volume de l'aliment,
- de la température et du temps de chauffage (barème).

Cinétique de destruction des microorganismes:

A n'importe quel temps t , le nombre de M.O. en vie (N) est égale à :

$$N = N_0 e^{-kt} \quad \Longrightarrow \quad \ln N = \ln N_0 - kt \quad \text{ou} \quad \log N = \log N_0 - \frac{k}{2,303} t$$

N_0 : nombre initial de M.O. et k : vitesse relative de destruction thermique (en min^{-1}).

$$D = \frac{2,303}{k} \quad (D = \text{temps de réduction décimale M.O. } (N = 0,1 \times N_0))$$

$$\log N = \log N_0 - \frac{t}{D} \quad \text{ou} \quad N = N_0 10^{-\frac{t}{D}}$$

L'efficacité du barème peut être décrite par :

➤ **Le temps de réduction décimal (D)** est le temps nécessaire, à une température donnée, pour réduire de 90 % le nombre de M.O. présent au début du temps D.

Ex de lecture : pour *salmonella spp* dans du chocolat au lait, $D_{70} = 10$ heures signifie que, pour détruire 90 % des salmonelles de cette espèce présente dans du chocolat au lait, il faut 10 h à 70°C.

D dépend de la température, plus T est élevée plus D est faible. Plus la denrée est contaminée au départ, plus D est élevée et plus le traitement devra être intense. Il faut donc limiter au maximum la contamination initiale.

➤ **Le coefficient de réduction décimal (Z)** est l'augmentation de la température réduisant D de 10 % Il caractérise l'évolution de D avec la température et s'exprime en °C.

Pour *Bacillus cereus*: avec $Z = 10$ °C : Si $D_{100^\circ\text{C}} = 25$ minutes, Alors $D_{110^\circ\text{C}} = 22,5$ minutes

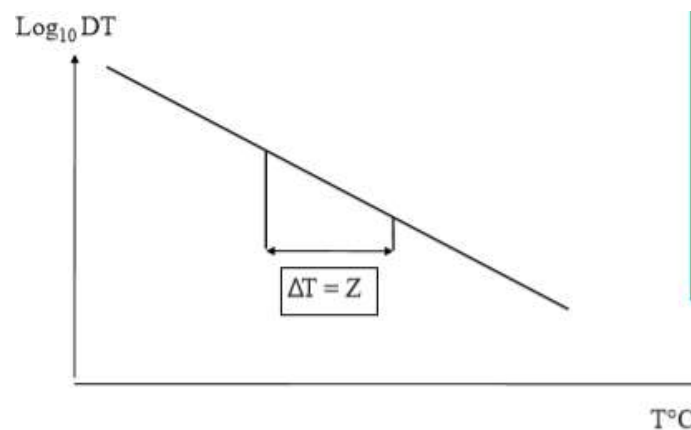


Figure 8 : Variation du temps de réduction décimale (D) en fonction de la température ($T^\circ\text{C}$)

D (ou k) et Z (Ea) sont des paramètres caractéristiques de la thermorésistance de chaque espèce de microorganisme. Plus Z est grand, plus le microorganisme est résistant à une élévation de la température ; par contre, plus Z est petit, plus le microorganisme est sensible à une élévation de température.

Les microorganismes sont regroupés selon leur thermorésistance " F " appelé " Force stérilisatrice " ou " valeur stérilisatrice ".

Groupe 1. Sensible : $F \leq (10 \text{ min à } 80^\circ\text{C})$, mesuré en milieu faible en lipides. La pasteurisation est fatale pour les champignons, les levures, les bactéries non-sporulées et les germes pathogènes. Dans le cas des conserves, si l'emballage est intact, ces micro-organismes ne causent pas de risques. Quand l'emballage n'est pas intègre, il y a une chance de réinfection par exemple causée par l'entrée de l'eau réfrigérante contaminée. Dans le cas des demi-conserves : il y a quelques

non-sporulées (Staphylococcus, Streptococcus, Corynebacterium et Lactobacillus.) qui peuvent survivre à la pasteurisation.

Groupe 2. Résistants : $(10 \text{ min à } 80 \text{ °C}) < F \leq (10 \text{ min à } 115 \text{ °C, ou } 4 \text{ min à } 120 \text{ °C})$, mesuré en milieu de pH 6-7, faible en lipides. On a choisi cette limite de 4 min. 120°C pour pouvoir justement tuer les spores les plus résistants de *Clostridium botulinum*. Cette bactérie forme la toxine “botuline” dans des milieux non-acides. Dans ce groupe, on trouve généralement les bactéries sporulées, comme Bacillus et Clostridium, groupées dans le tableau suivant.

Groupe 3. Ultra Résistants : $F > (4 \text{ min à } 120 \text{ °C})$. C’est le cas surtout des thermophiles (50-55°C), qui peuvent causer des dégâts considérables dans les zones tropicales. De même que quelques non-thermophiles, par exemple *Clostridium Sporogènes*. Ces thermophiles posent des problèmes importants; on ne peut pas chauffer l’aliment jusqu’à la mort des plus résistants. Cela coûterait trop cher en plus de la déformation et de la décomposition du produit.

Les aliments sont divisés en trois groupes selon leur pH :

Type 1. Aliments acides à pH < 4,5. Ce sont surtout les fruits (agrumes, baies, tomates, ananas, poires). La valeur F est petite, causée par le pH bas. Ces aliments sont assez faciles à conserver par voie thermique, parce que les spores non-détruites ne sont pas capables de germer à ce pH. Appliquer le traitement 1 : 10 min, 80°C (pasteurisation).

Type 2. Aliments à faible acidité, et pauvre en lipides, avec un pH > 4,5. Ce sont les légumes (pH 5-6) (petit pois, haricots vert). F est plus grand qu'avec les aliments du type 1. Les spores peuvent germer parce que le pH est favorable; les ultrarésistants sont souvent absents; les produits de conservation ne sont pas autorisés. Dans ce cas, les aliments doivent contenir le minimum de spores vivantes. Appliquer le traitement 2 : 10 min à 115 °C (stérilisation).

Type 3. Aliments à faible acidité, et riche en lipides (15-45%), avec pH 5,5-6,5. Ce sont par exemple les graines oléagineuses. F est plus grand qu'avec les aliments du type 2, à cause du rôle protecteur des lipides contre l’effet thermique sur les cellules. Contrairement aux aliments de type 2, ici quelques produits de conservation sont autorisés (sel, nitrate, nitrite, substances de fumées). On recommande le traitement 2, par exemple 10 min à 115°C.

II.2. STÉRILISATION PAR LA CHALEUR

La **stérilisation** par la chaleur consiste à exposer les aliments à une température, généralement supérieure à 100°C, pendant une durée suffisante pour inhiber les enzymes et toute forme de microorganismes, même les bactéries sporulantes.

La **stérilisation** d'un aliment ne suffit pas, à elle seule, pour sa conservation à long terme. Une contamination ultérieure de l'aliment par les microorganismes environnementaux pourrait survenir. Pour en remédier, on procède à la stérilisation du contenant (récipient) et du contenu (le produit alimentaire) ; le récipient doit être étanche à l'eau et aux microorganismes pour ne pas avoir une recontamination ultérieure à la stérilisation.

La stérilisation de l'aliment et de son contenant peut être réalisée de deux façons : La première consiste à une stérilisation simultanée du contenant et du contenu (**appertisation**), alors que la deuxième consiste à une stérilisation séparée du contenant et du contenu suivie d'un **conditionnement aseptique**.

II.2.1 Appertisation : Stérilisation simultanée du contenant et du contenu

L'**appertisation** est un procédé de conservation qui consiste à stériliser par la chaleur des denrées périssables dans des contenants (boîtes métalliques, bocaux, etc.) hermétiquement fermés. Sa découverte remonte aux années 1790. Nicolas Appert était le premier qui a mis au point ce procédé de stérilisation par la chaleur dans un récipient hermétiquement clos.

L'**appertisation** est largement utilisée aujourd'hui pour la conservation à long terme des denrées alimentaires d'origine animale ou végétale. La durée de conservation des aliments appertisés est de plusieurs mois à quelques années.

II.2.2. Stérilisation séparée du contenant et du contenu

Dans ce cas, le produit alimentaire (le contenu) est stérilisé, par traitement thermique, avant d'être renfermé dans son contenant. Ce dernier est aussi stérilisé, soit par la chaleur, soit par d'autres procédés (par ultra-violet par exemple), mais avant de contenir le produit. Ensuite, le contenu stérilisé est fermé hermétiquement dans son emballage (contenant), aussi stérilisé. L'opération de conditionnement se déroule dans une enceinte qui empêche la contamination du produit par les microorganismes de l'environnement : C'est le **conditionnement aseptique**. Cette technique est utilisée généralement pour la conservation des produits liquides (lait, jus, etc.) dans des emballages qui ne peuvent supporter l'appertisation comme les sachets en plastique et les cartons type Tetra-brik.

II.2.3. Upérisation ou technique UHT (Ultra Haute Température)

L'**upérisation** est une stérilisation à haute température (135°C à 150°C) pendant une courte durée (1 sec. à 15 sec.) sur le produit en vrac au moyen d'une inondation de vapeur, puis d'un refroidissement immédiat sous vide de telle sorte que la vapeur extraite soit en quantité égale à celle qui a été utilisée pour la stérilisation. Le produit est ensuite placé dans un emballage aseptique pour un conditionnement exempt de microbes. Cette technique préserve la qualité organoleptique et nutritionnelle du produit grâce à la rapidité du chauffage. Cependant, elle n'est utilisée que dans le cas des produits liquides comme les jus de fruit, compote, soupe, sauce tomate.

II.3. PASTEURISATION PAR LA CHALEUR

La **pasteurisation** est un traitement thermique modéré et suffisant (figure 9) permettant la destruction des microorganismes pathogènes et d'un grand nombre de microorganismes d'altération. La température du traitement est généralement inférieure à 100 °C et la durée est de quelques secondes à quelques minutes. Le tableau IV donne, à titre d'illustration, quelques exemples de **barèmes de pasteurisation**.

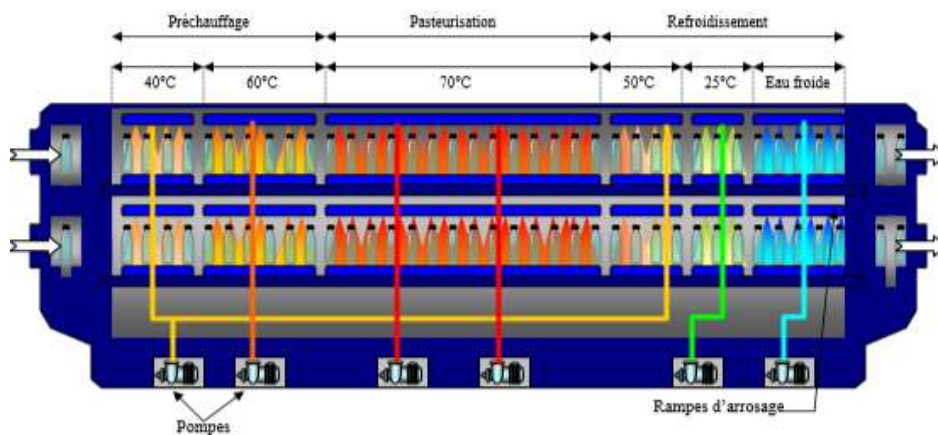


Figure 9 : Schéma d'un pasteurisateur pour bouteille

Tableau IV : Exemple de barème de pasteurisation

Produits	Température pasteurisation	Durée traitement
Jus de fruit (pH<4,5)	65 °C	30 min
	77 °C	1 min
	88 °C	15 s
Lait (pH>4,5)	63 °C	30 min
	72 °C	15 s
Crème glacée (pH>4,5)	65 °C	30 min
	71 °C	10 min
	80 °C	15 s

Tous les microorganismes n'étant pas éliminés par la pasteurisation, ce traitement thermique doit être suivi d'un brusque refroidissement. Les aliments pasteurisés sont alors habituellement conservés au froid (+4 °C) afin de ralentir le développement des germes encore présents. Leur durée de conservation est ainsi limitée.

En dehors de la réfrigération, d'autres moyens de conservation peuvent être utilisés parallèlement pour contrer le développement des microorganismes survivants, comme l'ajout d'agents chimiques de conservation, la réduction de l'activité de l'eau (a_w), l'acidification, etc.

II.4. BLANCHIMENT

Le **blanchiment** est un traitement thermique de quelques minutes à 70 °C à 100 °C destiné à détruire les enzymes susceptibles d'altérer les légumes ou les fruits avant leur traitement ultérieur (surgélation, séchage, etc.). En réalité la destruction des enzymes n'est qu'un objectif parmi bien d'autres et le rôle du blanchiment qui constitue un prétraitement avant séchage, lyophilisation, appertisation ou surgélation, est multiple.

II.4.1 Rôle du blanchiment

Avant **séchage** ou **lyophilisation**, le **blanchiment** est utilisé comme un prétraitement pour la destruction des enzymes responsables d'altérations organoleptiques telles que des modifications de saveurs et/ou de couleur. Le traitement permet aussi la réduction de la charge microbienne et facilite la réhydratation.

Avant **appertisation**, le **blanchiment** n'est pas destiné à détruire les enzymes du moment où les barèmes appliqués suffisent largement à leur destruction. Dans ce cas, le blanchiment a d'autres rôles :

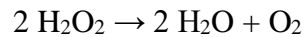
- Élimination des gaz occlus dans les tissus avant emboîtement, faute de quoi leur présence entraîne une surpression interne, avec risque de bombage ou de flochage des boîtes.
- Remplissage à chaud : On prend généralement la précaution de remplir les boîtes de jus chaud de manière à ce que le sertissage (ou capsulage) ait lieu sous atmosphère de vapeur et que l'air soit ainsi chassé. Le blanchiment permet d'emboîter les légumes chauds et d'empêcher un refroidissement du jus au contact de légumes qui seraient froids.
- Élimination de faux goûts : Les choux-fleurs non blanchis conservent un goût âcre intolérable.
- Élimination de troubles : Le blanchiment permet d'éliminer les troubles tels que ceux apportés par extraction d'amidon.

Avant **surgélation**, le blanchiment permet, outre la destruction des enzymes, l'élimination des gaz occlus dans les tissus et limiter par conséquent les phénomènes d'oxydation.

II.4.1 Contrôle du blanchiment

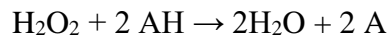
L'efficacité du blanchiment peut être contrôlée en testant l'inactivation ou la présence de deux enzymes largement répandues dans les végétaux : la catalase et la peroxydase.

La catalase est une enzyme oxydative qui donne lieu à la formation d'oxygène à partir du peroxyde d'hydrogène :



L'activité de la catalase est mise en évidence en broyant le produit blanchi et le mélangeant à du carbonate de calcium et du peroxyde d'hydrogène : un dégagement gazeux (O_2) indique une activité catalasique.

La peroxydase est une enzyme qui catalyse l'oxydation par le peroxyde d'hydrogène de divers substrats :



L'activité de la peroxydase est révélée par l'apparition d'une teinte brun-noir lorsqu'on place du guaïacol et du peroxyde d'hydrogène au contact du produit blanchi.

La peroxydase est réputée la plus thermorésistante ; l'efficacité du blanchiment peut alors être évaluée en se basant uniquement sur le test d'inactivation ou de présence de cette enzyme.

II.4. CUISSON

La **cuisson** consiste à soumettre un aliment à la chaleur afin de les rendre consommables. Selon les barèmes appliqués, la cuisson peut être associée à une réduction substantielle, voir même une élimination, de la charge microbienne présent sur le produit. Les produits cuits peuvent être conservés au réfrigérateur pendant quelques jours, et au congélateur pendant quelques semaines.

La cuisson vise à changer l'état ou la constitution de l'aliment par le traitement thermique en vue de :

- une meilleure digestibilité et assimilation de l'appareil digestif ;
- une amélioration de la qualité organoleptique du produit (goût, odeur, couleur, texture) ;
- une augmentation de la qualité hygiénique du produit pour éviter les TIA.

Il existe cinq **modes de cuisson** de base : Les aliments peuvent être plongés dans un liquide tel que de l'eau, du bouillon (parfumé ou non), immergés dans des graisses animales ou de l'huile (friture) ou bien poêlés dans de petites quantités de graisses chaudes (sautés), à la flamme nue (rôtissage, cuisson au four, cuisson au grill), en vase clos (étouffé) ou exposés à la vapeur (cuisson à la vapeur et, dans une certaine mesure, braisage).

CHAP III. CONSERVATION PAR REDUCTION DE L'ACTIVITE DE L'EAU

III.1. INTRODUCTION

L'eau présente dans les tissus végétaux et animaux peut être plus ou moins « disponible » et l'on a distingué : « **eau libre** » et « **eau liée** ». L'expérience a d'ailleurs montré que l'eau dite « liée » peut elle-même être fixée plus ou moins fortement, et que l'état de l'eau présente dans l'aliment a autant d'importance pour la stabilité de l'aliment que la teneur totale en eau. Ce qui permet le plus facilement de donner une mesure de cette plus ou moins « disponibilité » de l'eau dans les divers aliments est l'**activité Aw** définie par l'abaissement de pression partielle de vapeur d'eau. Aw caractérise l'état de rétention de l'eau dans le produit et renseigne sur le comportement de celui-ci à l'égard des agents d'altération. Aw d'une solution ou d'un aliment est toujours < 1 .

La **réduction de l'activité** de l'eau d'un aliment peut se faire par deux méthodes différentes. La première est une méthode directe qui consiste à extraire l'eau de l'aliment par déshydratation. La deuxième est une méthode indirecte qui consiste à lier l'eau disponible par ajout d'agents dépresseurs de l'activité de l'eau.

III.2. REDUCTION DE L'AW PAR DESHYDRATATION

La déshydratation des aliments est réalisée par différentes techniques comme le séchage, l'évaporation ou la lyophilisation. Elle permet de diminuer l'activité de l'eau d'un aliment à des valeurs proches de 0.

III.2.1 Aspects générales du séchage

Principe : enlever la majeure partie de l'eau (libre) de l'aliment par vaporisation ou sublimation (lyophilisation) pour réduire l' a_w , empêcher la prolifération des M.O., et ralentir les réactions chimiques et enzymatiques de détérioration.

Comment enlever l'eau ?

Par voie mécanique: Centrifugation (sédimentation forcée), filtration, ultrafiltration (tamisage moléculaire), osmose inverse, égouttage, essorage et pressage.

Ces méthodes de déshydratation économisent l'énergie, préservent la qualité du produit ; mais, limitent la perte en eau (HR 60%) et sont faiblement sélectives.

Par voie thermique:

- ébullition ou séchage sous vide, le transfert de chaleur est effectuée soit par conduction, soit par rayonnement: Sécheur cylindre.
- entraînement de l'eau sous forme de vapeur ou séchage par l'air à pression atmosphérique : La chaleur est apportée à l'aliment soit par de l'air chaud (convection), soit par contact avec une surface chaude (conduction): atomiseur, sécheur à lit fluidisé.
- lyophilisation (cryo-dessiccation) ou séchage par sublimation, l'aliment est d'abord congelé, puis la glace formée est sublimée.

Ces méthodes entraînent : l'élimination d'une grande quantité d'eau, une grande consommation d'énergie, l'altération de la qualité du produit, les oxydations (M.G, vitamines), la réaction de Maillard, l'insolubilisation des protéines, la volatilisation des arômes.

Pourquoi le séchage ?

- Diminuer a_w , ce qui augmente la durée de conservation.
- Alléger le produit, réduire les frais de transport, de stockage et de congélation.
- Créer de nouveau produit.

Inconvénient du séchage

- Diminution de la qualité (perte de vitamine)
- Perte de la qualité organoleptique : le produit devient dure et change de goût.

Phénomènes physiques du séchage

Physiquement, lors du séchage, deux phénomènes interviennent:

- transfert de chaleur pour apporter l'énergie nécessaire à la transformation de l'eau en vapeur (chaleur latente de vaporisation) ; peut se faire par **conduction**, par **convection** et par **rayonnement**.
- transfert de matière (vapeur d'eau) à travers et en dehors du produit ; se fait en maintenant aussi basse que possible la pression partielle de vapeur d'eau dans l'atmosphère ambiante.

III.2.2. Appareils et procédés de séchage

Il existe un très grand nombre de procédés et d'appareils de séchage, la classification est basée sur des critères d'ordre technique tels : la pression, ou encore le mode de transfert de chaleur.

Le choix d'un procédé de séchage dépend des caractéristiques du produit : caractère physique (solide, liquide,...) et caractère chimique (sensibilité à la chaleur ou à l'oxydation par l'air).

1°) **Four à air chaud** : Un débit rapide d'air chaud et une agitation de la couche de produit assurent un séchage plus uniforme.

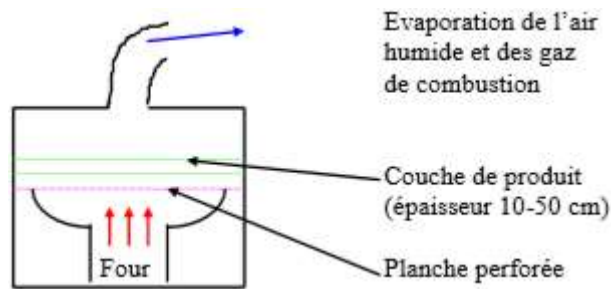


Figure 10 : Schéma d'un four à air chaud.

2°) **Sécheur à plateau** : L'aliment est étalé en couche mince sur des plateaux. Il est chauffé, soit par des étagères chauffantes, soit par l'air chaud circulant entre les étagères.

3°) **Sécheur à tunnel** : Le produit placé sur des plateaux disposés sur des chariots, qui parcourent un tunnel où circule de l'air chaud.

4°) **Sécheur à bande perforée mobile** :

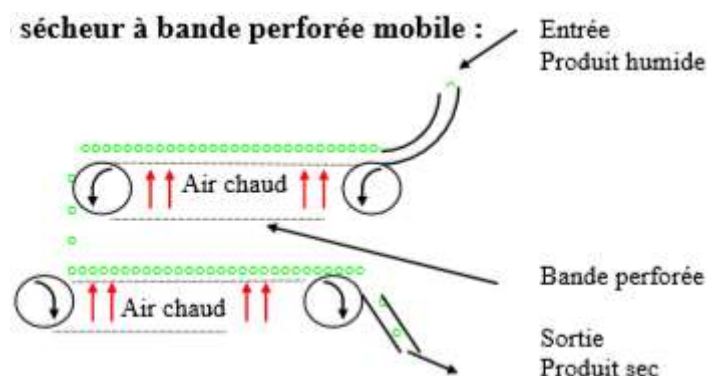


Figure 11 : Schéma d'un sécheur à bande perforée mobile

5°) **Sécheur rotatif** : Dans cet appareil le produit progresse tout en étant agité à l'intérieur du cylindre rotatif légèrement incliné.

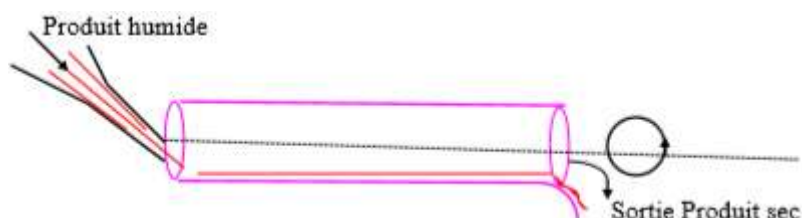


Figure 12 : Schéma d'un sécheur rotatif

6°) **Sécheur à atomiseur** : Une solution ou une suspension plus au moins visqueuse de produit est atomisée (transformée en aérosol ou brouillard), les petites gouttes de liquide ainsi formées

sont entraînées et déshydratées dans un courant d'air, donnant une poudre sèche avant de tomber sur la paroi inférieure de l'appareil.

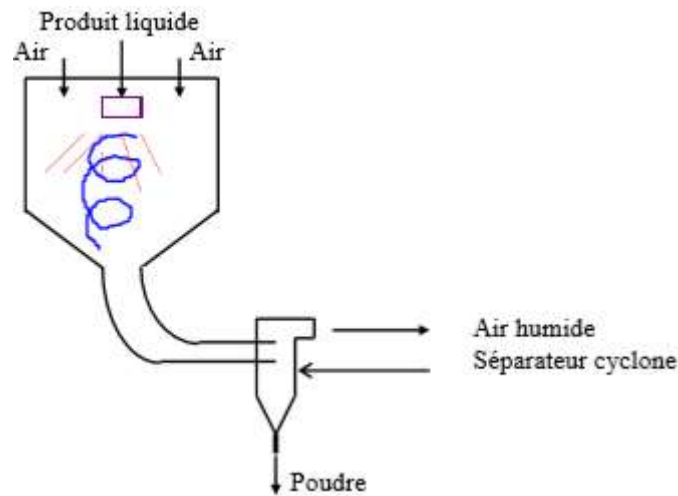


Figure 13 : Schéma d'un sécheur à atomiseur

Ces appareils sont utilisés pour la déshydratation de divers produits liquides tels extrait concentré de café, jus de fruits. Le séchage par atomisation préserve bien les propriétés organoleptiques des aliments, en raison de la rapidité et de la faible température du séchage, et ceci est important pour les produits thermosensibles tels les jus de fruits (séchés à 30°C dans des tours élevées de 60 m).

7°) Sécheurs à tambour rotatif : Dans cet appareil, en mode direct, le produit est séché par l'injection d'un flux d'air chaud, à co-courant ou à contre courant. Tout en séchant, il suit le mouvement de rotation du tube sécheur et les releveurs internes brassent le produit et le font avancer progressivement vers la sortie. En mode indirect, la virole du tambour devient la surface d'échange de chaleur pour l'évaporation.

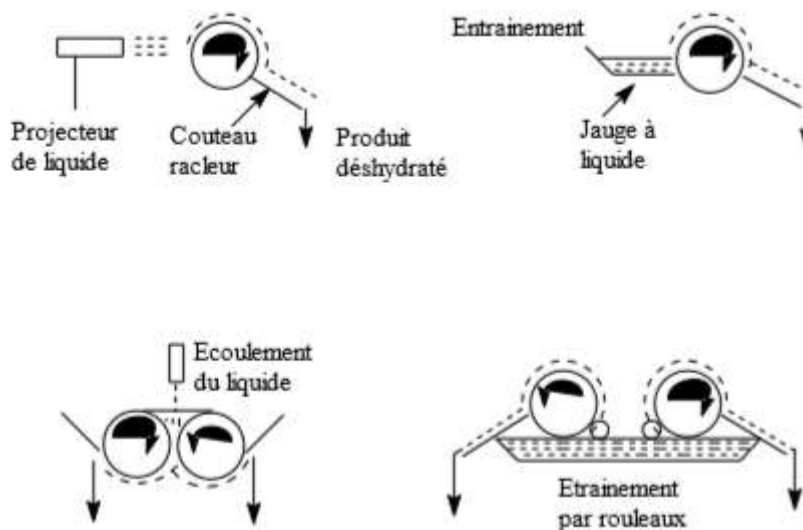


Figure 14 : Schéma de sécheurs à tambour rotatif

8°) Lyophilisateur (cryo-dessicateur) : Le produit est d'abord congelé (1,2) puis la glace qui est formée est sublimée par un abaissement de pression (2,3) puis une légère augmentation de température (3,4). Procédé endothermique, la chaleur de sublimation est de 680 Kcal/Kg de produit, il est nécessaire d'apporter la chaleur jusqu'au front de la sublimation sans provoquer la fusion de l'aliment congelé (précision de transfert).

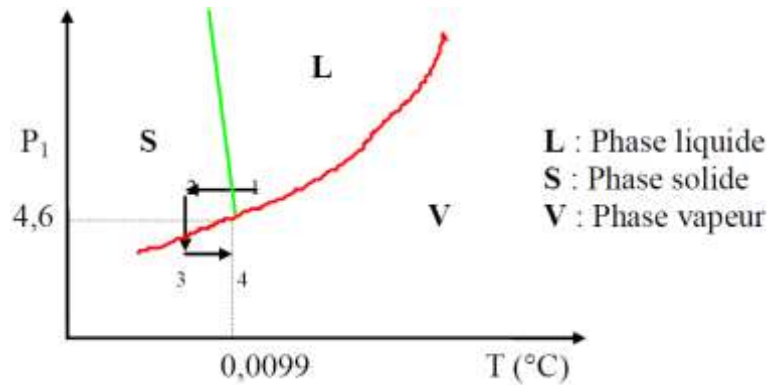


Figure 15 : Principe de lyophilisation

- La lyophilisation est très utilisée en industrie pharmaceutique pour la déshydratation de solutions et de produits thermolabiles (vaccin, antibiotique, sang,...).
- Elle est beaucoup moins utilisée en I.A., car onéreuse (café en poudre, champignon, ...).
- Les aliments lyophilisés sont très hygroscopiques et poreux, donc nécessitent un emballage rigoureusement étanche sous vide ou sous atmosphère d'azote, et reviennent à des prix élevés (aliment de luxe).

III.3. REDUCTION DE L'AW PAR AJOUT D'AGENTS DEPRESSEURS

Les **agents dépresseurs de l'activité de l'eau** sont des constituants qui sont présents dans les aliments et baissent l'activité de l'eau (A_w) en mobilisant partiellement l'eau et diminuant ainsi sa capacité à s'évaporer et probablement sa réactivité chimique. Ils n'appartiennent à aucune famille chimique particulière. L'activité de l'eau dépend de la nature et de la quantité des substances en solution dans la phase aqueuse de la denrée alimentaire (ou de la solution).

Les dépresseurs de l' a_w les plus utilisés en industrie agroalimentaire sont les sels, notamment le NaCl, et les glucides, notamment les mono- et disaccharides. Le tableau V donne quelques valeurs de l' a_w de solutions de différentes concentrations de NaCl et de saccharoses mesurés à 25 °C.

Tableau V : A_w de solution de NaCl et de saccharose (Concentration en g/100 g d'eau, a_w mesurée à 25 °C)

A_w	NaCl	Saccharose
0,99	1,75	11
0,96	7,01	25
0,94	10,34	93
0,92	13,5	120
0,90	16,5	144
0,85	23,6	208

L'utilisation des sels et des glucides est la technique la plus simple et la moins coûteuse pour réduire l' a_w d'un aliment et améliorer ainsi sa conservabilité. Cependant, elle ne peut être envisagée que dans le cas de préparations spéciales où le sel ou le sucre jouent un rôle déterminant dans les caractéristiques organoleptiques de l'aliment. C'est le cas par exemple des olives salées et des produits de la confiserie.

III.3.1. Salage

La conservation par le sel ou salage consiste à soumettre une denrée alimentaire à l'action du sel soit en le répandant directement à la surface de l'aliment (salage à sec) soit en immergeant le produit dans une solution d'eau salée (saumurage). Le sel pénètre dans les tissus et détruit les bactéries par augmentation de pression osmotique. En diminuant l'activité de l'eau du produit, ce procédé permet aussi de freiner ou de bloquer le développement microbien. Cette technique est souvent utilisée sur les olives et les denrées alimentaires végétales (condiments).

III.3.2. Sucrage

Le sucrage ou l'ajout de sucre, notamment le saccharose, est une technique qui est aussi largement utilisée en IAA.

Le sucre est généralement utilisé comme ingrédients pour l'amélioration du goût, la couleur et/ou la texture de certains produits alimentaires comme les boissons, les sauces (Ketchup) et plusieurs autres préparations. Dans d'autres produits alimentaires, comme le caramel et les sirops de glucose, le sucre est la matière première principale utilisée pour leur préparation.

L'ajout de sucre à des proportions assez suffisante améliore la conservabilité des denrées alimentaires et ce grâce à son effet dépresseur de l' a_w . La conservabilité de certains aliments comme les bonbons et les sirops de glucose est due principalement à la présence de sucres.

III.3.3. Autres agents dépresseurs

Ces **autres agents dépresseurs** de l' A_w sont des solutés très solubles ou des solvants miscibles à l'eau, possédant un faible poids molaire et ayant un effet dépresseur sur la fraction libre de l'eau contenue dans les aliments. Leur effet dépresseur est limité par rapport à ceux du sel et du sucre et leur prix est relativement élevé. Leur utilisation est dès lors plus souvent envisagée pour améliorer la valeur nutritionnelle d'une denrée ou pour renforcer le goût de celle-ci (tableau VI).

Tableau VI : Principaux agents dépresseurs de l' A_w et leurs principaux rôles et utilisation en technologie alimentaire

Liste des principaux composés		Dépresseurs de l' A_w - humectant	Plastifiant	Retardateur de la cristallisation	Agents facilitant la réhydratation	Retardateur des transferts d'eau	Substituant du saccharose	Antimicrobiens	Autres rôles (*)
Sels minéraux	NaCl, KCl, CaCl ₂	+	+		+				+
	Phosphates et polyphosphates	+							+
	Carbonates et sulfates	+							+
	Sels de lactosérum	+	+						+
Acides Organiques	Acides alimentaires organiques et leurs sels de Na, K, Cl	+	+	+				+	+
	Acide Ascorbique	+							+
Mono, Di et Oligosaccharides	Pentoses	+	+						
	Hexoses (glucose, fructose, mannose, galactose et autres isomères en C ₆)	+	+	+			+		
	Disaccharides (saccharose, lactose, maltose)	+	+				+		
	Oligosaccharides divers	+	+				+		
Dérives de saccharides	Sucre interverti, miels, sève d'érable, sirop de fructose-glucose et sirop de glucose jusqu'à DE 20	+	+	+			+		
	Maltodextrine DE 3 à 20	+			+				
	Dextrines diverses, polysaccharides, hydrolysats de pectine, de mucilages de cellulose	+	+	+			+		
Alcools et Polyols	Ethanol	+						+	
	Sorbitol	+	+	+	+		+		
	Manitol, Xylitol	+	+				+		
	Glycérol	+	+	+	+		+	+	
	Polyethylene glycols	+				+			
Protéines et dérivés	Acides aminés et leurs sels	+	+						+
	Oligopeptides	+							+
	Hydrolysats de protéines	+	+						+
Lipides et dérivés	Mono et Diglycérides	+	+		+	+			+
	Phospholipides	+	+		+	+			+
	Esters de saccharose, stéaroyl lactate	+	+		+	+			+
	Emulsions	+	+			+			+

CHAP IV. CONSERVATION PAR REDUCTION DU PH

IV.1. INTRODUCTION

Pour mesurer l'acido-basicité d'un milieu dans l'eau, les chimistes se sont dotés d'une unité de mesure appelée pH, dont les valeurs sont comprises entre 0 et 14. Le pH de l'eau pure, égal à 7 (à 25 °C), représente la limite entre les acides et les bases : les solutions dont la valeur du pH est inférieure à 7 sont acides et celles dont la valeur du pH est supérieure à 7 sont basiques.

L'échelle du pH a été introduite par le chimiste danois Søren Sørensen, en 1909, alors qu'il contrôlait la qualité du brassage de la bière. Cette échelle est maintenant largement utilisée en chimie, en géologie, en écologie, en médecine, dans l'industrie et en agriculture.

En solution aqueuse, on définit le pH de la manière suivante :

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Lorsqu'un acide est ajouté à l'eau, la concentration en ions hydrogène $[\text{H}^+]$ augmente et est supérieure à la concentration des mêmes ions dans l'eau pure. Ainsi, plus la solution est acide (plus la concentration en ions H^+ est élevée), plus le pH est faible, et réciproquement.

Si l'échelle du pH peut varier de 0 à 14, le pH des produits alimentaires se situe généralement dans la zone de 2 à 7. Le pH des produits d'origine végétale est souvent plus faible que celui des denrées alimentaires d'origine animale, surtout s'il s'agit des fruits.

Tableau VII : pH approximatifs de quelques produits alimentaires

Produits alimentaires	pH
Bœuf	5,3 à 6,2
Poulet	5,8 à 6,4
Poissons	6,5 à 6,8
Lait frais	6,3 à 6,5
Beurre	6,1 à 6,4
Carottes	5,2 à 6
Pommes de terre	5,4 à 6,2
Oignons	5,3 à 5,8
Tomates	4,2 à 4,9
Pommes	2,9 à 3,3
Oranges	3,6 à 4,3
Citrons	2,2 à 2,4

IV.2. INFLUENCE DU PH SUR LA CONSERVATION DES ALIMENTS

Les réactions d'altération, qu'elles soient chimiques, enzymatiques ou microbiologiques, sont influencées largement par le pH du milieu (voir tableau VIII).

Tableau VIII : Effet du pH sur les réactions d'altération des produits alimentaires

Réactions d'altération	pH minimal	pH optimal	pH maximal
Croissance des moisissures	1,5 à 3,5	4,5 à 6,8	8 à 11
Croissance des bactéries	4,5	6,5 à 7,5	9,0
Croissance des levures	1,5 à 3,5	4,0 à 6,5	8,0 à 8,5
Brunissement enzymatique	5	6 à 6,5	7
Réaction de Maillard	1	4 à 7	9

Il ressort du tableau que la plupart des microorganismes se développent mieux à un pH voisin de 7 (4 à 7,5). Certaines bactéries, notamment les bactéries lactiques et acétiques, sont capables de se multiplier à des pH plus bas que 4.

Par ailleurs, étant donné que les bactéries pathogènes et la majorité des bactéries d'altération ne se développent pas à des pH <4,5, on divise les produits alimentaires en deux catégories : Les **produits faiblement acide** et les **produits acides**.

Les produits alimentaires faiblement acides, dont le pH \geq 4,5, sont considérés moins stables. Leur stabilisation par la chaleur nécessite un traitement thermique de stérilisation pour les débarrasser de tous les germes pathogènes et d'altération, y compris les spores bactériennes.

Les produits alimentaires acides, dont le pH < 4,5, sont considérés relativement stables. Leur stabilisation par la chaleur nécessite un traitement moins sévère, comme la pasteurisation, pour éliminer les levures, les moisissures et quelques bactéries acidophiles, dont aucune espèce n'est sporulante.

On donne ci-après l'échelle suivante des effets du pH sur la résistance à la chaleur des spores du *Bacillus subtilis*.

pH	Temps de survie à 100°C en minutes
4.4	2
5.6	7
6.8	11
7.6	11
8.4	9

Evidemment, le traitement des produits diffère selon l'effet du pH en fonction de son degré d'acidité (tableau IX).

Tableau IX : Classification d'aliments en conserves en relation avec les exigences du traitement thermique

Degré d'acidité	pH	Aliments	Groupe alimentaire	Agent d'altération	Exigence du traitement
Faible	7.0	Œufs, huitre, lait, canard, poulet, morue, bœuf, sardines	Viandes, poissons, lait, volaille	Bactéries anaérobies, sporulentes, mésophiles	Généralement un traitement à température élevée De 115 à 126°C
	6.0	Corned beef, fèves de Lima, pois, carottes, betteraves, asperges, patates	Légumes	Thermophiles	
	5.0	Figues, soupes aux tomates	Soupes	Enzymes	
Moyen	4.5	Ravioli, piments, concentré de tomate	Produits formulés	Niveau minimal pour <i>Clostridium botulinum</i>	
Acide	4.0	Salades de patates/tomates, poire, abricot, pêches, oranges	Fruits	Bactéries aciduriques non sporulentes	Généralement à l'eau bouillante A 100°C
	3.7	Choucroute, ananas, pommes, fraises, pamplemousses	Baies	Bactéries aciduriques sporulentes	
	3.0	Cornichons, jus de citron et d'orange	Aliments à haute teneur en acides	Enzymes	
Elevé	2.0	Jus de lime	Aliments à très haute teneur en acide	Levures Moisissures	

Toutefois, il est important de signaler que certaines espèces de moisissures sont capables de métaboliser des acides, transformant ainsi un produit initialement acide en un produit faiblement acide.

IV.3. RÉDUCTION DU PH

La **réduction du pH** des produits alimentaires peut être réalisée par deux méthodes. La première, est une méthode directe, consiste à l'acidification du produit par l'ajout d'un ou plusieurs acides organiques ; les acides les plus utilisés sont l'acide acétique (vinaigre) et l'acide citrique. La deuxième est une méthode indirecte qui repose sur l'utilisation des microorganismes de fermentation.

IV.3.1. Acidification

L'**acidification** consiste à l'ajout d'un acide organique (comme l'acide acétique) ou un ingrédient acide (comme le citron) à un aliment qui est initialement peu acide. Il faut connaître le type d'acides et la quantité à ajouter pour que le pH du produit fini soit inférieur à 4,5, parce que certains acides, tels que les acides organiques (acide acétique par exemple) sont plus inhibiteurs que d'autres.

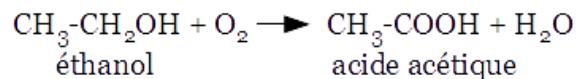
IV.3.2. Fermentation

La **fermentation** peut être définie comme l'utilisation contrôlée de microorganismes sélectionnés (levures ou bactéries spécialisées) dans le but de préserver les aliments par production d'acides ou d'alcool, et d'améliorer leurs qualités nutritionnelles ou organoleptiques. Elle est utilisée par exemple pour les concombres frais, olives, choux, cacao... L'amélioration de la conservabilité

Outre ces produits, qui représentent plus de 80 % des sucres utilisés, on obtient également de l'acide éthanoïque (acétique) et du glycérol. Pour le développement de l'arôme et du goût, il est très important d'assurer une répartition équilibrée des 2 types de fermentation.

- La **fermentation hétérofermentative facultative**. A partir du glucose, l'organisme suit la voie homofermentative, tandis que certains autres saccharides (rhamnose, mannose, ribose) sont fermentés d'une façon hétérofermentative (exemple par *Lactobacillus plantarum*).

La **fermentation acétique** est un procédé aérobie obligatoire dans lequel l'éthanol est transformé en acide acétique (exemple par *Acetobacter aceti*.):



Pendant le processus, il faut bien régulariser les quantités d'oxygène et d'alcool fournies et la pureté de l'organisme utilisé. Quand, par exemple, on a une infection par *Acetobacter peroxydans*, il y a surfermentation, c'est-à-dire que l'acide acétique est oxydé, causant la formation de H₂O et CO₂. Cela peut aussi avoir lieu quand la concentration d'oxygène est trop élevée ou la concentration d'alcool trop basse.

Remarque : la fermentation lactique **ne suffit pas à elle seule**, par la formation d'acide lactique, à assurer la conservation. Aussi, faut-il y associer d'autres moyens : addition de NaCl, élimination d'une part de l'eau, entreposage au frais.

Exemple de fermentation lactique :

- La choucroute : préparée au sel sec.
- Les concombres et les cornichons en saumure.
- Les olives des deux façons.

Tableau X : Teneur finale en sel et en acide lactique et les pH finaux.

	NaCl	Acide lactique	pH
Choucroute	2,0 à 2,5%	1,6 à 1,8%	3,5 à 4,0
Concombres / Cornichons	4 à 5%	1,0 à 1,2%	4,0 à 5,0
Olives	5 à 7%	0,8 à 1,0%	4 à 7

CHAP V. CONSERVATION PAR FUMAGE OU FUMAISON

V.1. DEFINITION ET RÔLES

A côté de la salaison et du séchage, le **fumage** (ou **fumaison**) appartient au groupe des trois procédés les plus anciens de conservation des denrées alimentaires. Il consiste à soumettre une denrée alimentaire à l'action des fumées qui se dégagent lors de la combustion de certains végétaux. La fumée produite par la combustion du bois contient des composés de type formol, phénols et acides pyrolytiques. Ces substances bactériostatiques -voire bactéricide- et fongistatiques inhibent la croissance des microorganismes (surtout moisissures et levures) à la surface du produit.

Le fumage joue plusieurs rôles : aromatisation, coloration, modification de la texture et préservation du produit par effet antimicrobien. Il s'applique principalement aux produits carnés pour lesquels le séchage suivi du fumage permet de conserver les viandes et poissons grâce à l'action combinée de la déshydratation et des antiseptiques contenus dans la fumée.

V.2. TYPE DE FUMAGE

Le **fumage à froid** est surtout pratiqué dans les pays tempérés. La température est maintenue entre 20 et 25 °C et ne doit en aucun cas dépasser 28 °C car le produit ne doit ni cuire ni trop se dessécher. Elle est régulée soit par admission d'air frais, soit par passage de la fumée dans un échangeur. Au cours de cette opération, on doit surveiller la ventilation, la température et l'hygrométrie de l'air. La durée de traitement varie de quelques heures à quelques jours, selon le type d'installation et le produit désiré.

Le **fumage à chaud** (ou **intense**) est la méthode la plus utilisée en pays tropicaux car on obtient un produit relativement stable. Les produits sont, le plus souvent, préalablement salés et séchés. L'association des trois opérations conduit au **sausage**. La température utilisée varie entre 60 et 120 °C : le produit est donc fumé et cuit en même temps (combinaison du séchage et du fumage).

Ce type de fumage combine :

- l'effet de séchage par réduction de la teneur en eau par l'air chaud ;
- la condensation des particules de fumée à la surface de la viande ;
- leur pénétration dans les couches internes du produit.

Le fumage intense peut donc augmenter considérablement la durée de vie d'un produit par la dénaturation des protéines et la destruction des micro-organismes.

V.3. PROCÉDES ET APPAREILS DE FUMAGE

Les fumoirs sont tout simplement les appareils qui permettent de fumer les aliments. Ils peuvent fonctionner avec de la sciure, du charbon ou avec du gaz.

V.3.1. Fumage naturel

Le fumage naturel consiste à exposer l'aliment à de la fumée issue de la combustion de bois (chêne, hêtre, noyer). Il existe deux procédés différents : le **fumage traditionnel en tuyé** (ou tuhé, ou tué) et le **fumage en cellule**.

Fumage en tuyé : cet appareil est en fait une grande cheminée, comportant un foyer en partie basse, une chambre d'exposition des aliments au-dessus, séparé du précédent par une grille, et le conduit d'évacuation de la fumée en partie supérieure. La fumée est obtenue en général par la combustion lente de sciure de bois.

Fumage en cellules : il s'agit de chambres en acier inoxydable dans lesquelles on place les aliments puis on fait circuler de la fumée en provenance d'un dispositif extérieur. La fumée peut être obtenue par combustion de sciure, ou par friction d'une bûche.

V.3.2. Fumage « liquide » ou addition d'arômes de fumée liquide

Il consiste à appliquer sur l'aliment un arôme de fumée liquide. Ce condensat est obtenu par récupération de fumées issues de la combustion de bois et mélange à l'eau ou à l'huile. Ces arômes de fumée, qui peuvent servir à donner un goût de fumée à des aliments très divers (chips, biscuits d'apéritif) font l'objet d'une réglementation particulière de l'Autorité européenne de Sécurité des Aliments.

L'addition d'extrait de fumée à l'aliment se fait de diverses manières : par addition directe, trempage, injection ou pulvérisation. Le tableau explique l'effet antiseptique de ces essences les viandes traitées.

Tableau XI : Effet des essences sur le stockage et la flore microbienne de la viande

Addition d'extrait de fumée p.p.m.	Prolongement du temps de stockage (facteur de multiplication)	Réduction de la flore microbienne (facteur de division)
10	1.08	3.18
20	1.18	3.89
50	1.63	5.35
100	4.46	7.14
120	14.42	7.77

V.3.3. Matériel de fumage en pays tropical (voir document joint)

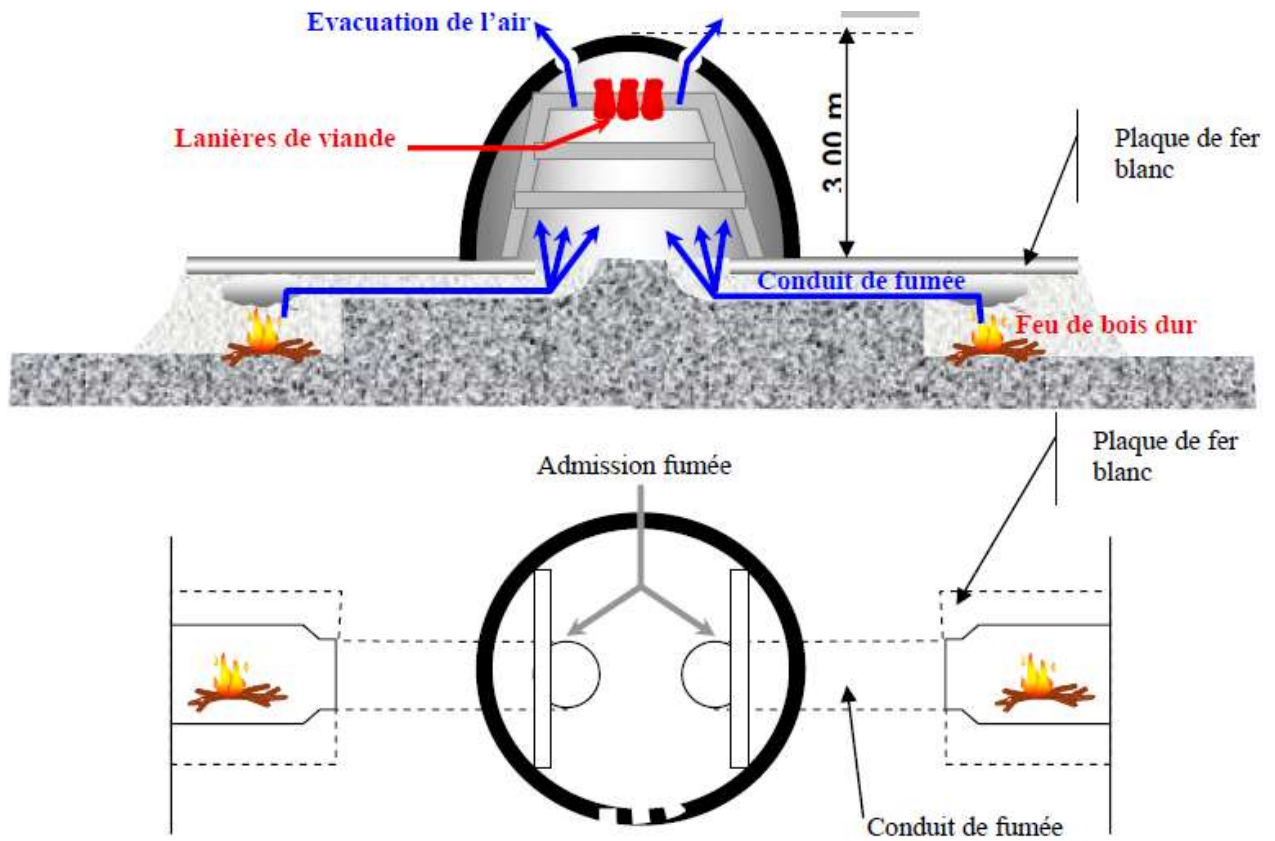


Figure 16 : Coupe transversale et longitudinale d'un fumoir traditionnel

CHAP. VI. CONSERVATION PAR LA MAITRISE DU POTENTIEL D'OXYDO-REDUCTION

VI.1. INTRODUCTION

Le **potentiel d'oxydoréduction** (E_h exprimé en volt) mesure la facilité avec laquelle un milieu perd ou gagne des électrons. Un milieu est oxydant quand il capte des électrons (son E_h est positif) ; et il est réducteur quand il perd des électrons (son E_h est négatif).

Un milieu contenant des substances fortement hydrogénées, des radicaux $-SH$, des sucres réducteurs, ou d'autres composés tels que de l'acide ascorbique (vitamine C) ou des tocophérols (vitamine E) sera réducteur. C'est le cas de nombreux produits alimentaires. L'effet oxydant d'un milieu est dû essentiellement à la présence de l'oxygène atmosphérique, soit en surface (viandes) ou dans la masse (végétaux : grâce aux parenchymes lacuneux et aux stomates).

Le **potentiel d'oxydoréduction** affecte la vitesse des réactions d'altération et le développement des microorganismes. En fonction de leurs exigences en oxygène, on classe les microorganismes en quatre catégories :

- Les aérobies stricts (*Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus*) sont les microorganismes qui ne peuvent se développer qu'en présence de l'oxygène.
- Les aérobies facultatifs (*Entérobactéries*, *Staphylococcus*) sont les microorganismes qui peuvent se développer en présence et en absence d'oxygène.
- Les anaérobies stricts (*Clostridium*, *Bactéroïdes*, ...) sont les microorganismes qui ne peuvent se développer en présence de l'oxygène.
- Les micro-aérophiles (*Lactobacillus*, *Streptococcus*, ...) sont les microorganismes qui ne peuvent se développer qu'en présence de quantité faible d'oxygène.

Le **potentiel d'oxydoréduction** d'un aliment dépend de ses caractéristiques physico-chimiques, de la présence ou non d'un emballage, de la pression partielle d'oxygène et de l'ambiance du stockage.

VI.2. MAÎTRISE DU POTENTIEL D'OXYDORÉDUCTION

Outre l'oxygène, d'autres gaz de l'atmosphère de stockage (vapeur d'eau, azote, CO_2) peuvent modifier le potentiel d'oxydoréduction d'un aliment.

Le CO_2 , utilisé pour le conditionnement des atmosphères (conservation des pommes, poires, céréales, etc.), possède en plus une action bactériostatique : sous pression élevée, il améliore la conservation des boissons gazeuses. Quant à l'azote, il est généralement considéré comme un gaz inerte parce qu'il ne participe à aucune réaction chimique dans les conditions normales de T et P.

Pour la maîtrise du potentiel d'oxydoréduction d'un produit, on a affaire à maîtriser l'environnement gazeux qui l'entoure. Pour ce fait, plusieurs techniques sont utilisées dont les plus importantes sont : Le conditionnement sous vide, le conditionnement sous atmosphère modifié et le conditionnement sous atmosphère contrôlé.

VI.2.1. Conditionnement sous vide

Le **conditionnement sous vide** consiste à un conditionnement associé à une évacuation des gaz et donc à une suppression d'oxygène de l'environnement du produit. Il permet donc de supprimer les effets néfastes dus à la présence de l'oxygène.

Ce type de conditionnement peut néanmoins présenter certains inconvénients. La pression atmosphérique, s'exerçant à l'extérieur du conditionnement mais pas à l'intérieur, donne lieu à une compression de l'aliment : cette compression peut entraîner la production de jus par l'aliment ou rendre difficile la séparation des tranches s'il s'agit d'un aliment tranché. En plus, cette technique ne conviendra pas aux aliments très fragiles (par exemple, les aliments recouverts d'une garniture).

VI.2.2. Conditionnement sous atmosphère modifiée

A la différence du conditionnement sous vide, le **conditionnement sous atmosphère modifiée**, encore appelé **conditionnement sous atmosphère protectrice**, consiste à modifier l'environnement gazeux du produit par une réinjection de gaz comme le CO₂ et l'azote.

Cette technique améliore nettement la conservabilité des denrées alimentaires. Cependant, les produits ainsi conditionnés ne peuvent être considérés comme microbiologiquement stables, cette technique doit bien évidemment être associée à une conservation sous régime froid ou combinée avec une autre barrière pour contrer le développement des microorganismes.

Aujourd'hui cette technique est appliquée à un grand nombre de denrées alimentaires telles que les légumes, les fruits, les pâtes fraîches, les pâtisseries, les biscuits, les snacks, le café, le thé, etc.

VI.2.3. Stockage sous atmosphère contrôlée

Dans le cas du stockage des produits végétaux frais comme les pommes et les poires, on ne peut pas se contenter de modifier l'atmosphère entourant le produit une seule fois pour toute. En effet, l'activité de respiration et de transpiration des cellules entraîne une modification continue de l'environnement gazeux. Il faut donc intervenir régulièrement pour maintenir l'atmosphère gazeuse dans les proportions désirées : C'est le **stockage sous atmosphère contrôlée**.

Le **stockage sous atmosphère contrôlée** est utilisé pour la conservation et, aussi, pour la maîtrise de la maturation des fruits en vrac. En effet, il s'avère intéressant, non seulement de conserver

longtemps les fruits, mais aussi de maîtriser au mieux leur maturation : la ralentir quand la demande est faible ou les stocks importants, l'accélérer quand la demande est élevée.

La conservation des fruits peut se faire dans des enceintes thermo-contrôlées dans lesquelles le mélange gazeux est modifié et contrôlé : quelques % d'oxygène et de dioxyde de carbone, le reste de l'atmosphère étant constituée d'azote. Cette enceinte peut être également couplée à un absorbeur d'éthylène. En effet, l'éthylène produit naturellement par les fruits accélère leur maturation. Il est donc intéressant de diminuer sa concentration si l'on veut retarder la maturation et donc conserver les fruits plus longtemps. Cette solution est préférable à l'utilisation d'inhibiteurs chimiques.

CHAP VII. CONSERVATION PAR RADIATIONS IONISANTES

VII.1. INTRODUCTION

Les **radiations ionisantes** correspondent à des rayonnements électromagnétiques ou particuliers possédant une énergie associée supérieure à 10 eV (électron-Volt). En-dessous de cette valeur en énergie, les **radiations** sont dites « **non ionisantes** » et on y classe notamment les rayonnements, infrarouge, ultra-violet ou encore les champs électromagnétiques de très basse fréquence (micro-onde).

Grâce à l'énergie qui leur est associée, les **radiations ionisantes** sont capables de déplacer les électrons des atomes et molécules et de les convertir en ions, d'où le terme de « **radiations ionisantes** » ou « **rayonnements ionisants** ».

Les **radiations ionisantes** sont appliquées aux aliments dont le but d'améliorer leur conservabilité. Les aliments ayant subi un traitement aux radiations ionisantes sont dites « **irradiés** ». Ils ne sont nullement « radioactifs ».

VII.2. TYPES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

L'**irradiation des aliments** peut être réalisée par trois types de rayonnements ionisants :

- **Rayons X** : Les rayons X sont produits par des appareils fonctionnant à un niveau d'énergie égal ou inférieur à 5 MeV.
- **Faisceaux d'électrons** : Les faisceaux d'électrons sont obtenus par des systèmes fonctionnant à un niveau d'énergie égal ou inférieur à 10 MeV.
- **Rayons γ** : Les rayons γ proviennent de la désintégration des isotopes radioactifs (radionucléides) ; il s'agit soit du Cobalt (^{60}Co), soit du Césium (^{137}Cs).

Les **rayons X** et γ sont plus pénétrants que les électrons, il faut une épaisseur de Pb, pour la protection, de plusieurs cm pour les arrêter.

VII.3. DOSE D'IRRADIATION ET DÉBIT DE DOSE

VII.3.1. Dose d'irradiation

La **dose d'irradiation** est la quantité d'énergie absorbée par l'aliment par quantité de masse. En unité S.I, la **dose d'irradiation** s'exprime en Gray (ou Gy) ; 1 Gy correspondant à l'absorption d'une quantité d'énergie d'un Joule par kg d'aliment. L'ancienne unité, le rad est encore couramment utilisé :

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

L'**irradiation** est classée en trois catégories, suivant la dose appliquée :

- La **radappertisation** (20 à 50 kGy) : détruit la totalité des microorganismes. On parle aussi de « radiostérilisation ».
- La **radicisation** (10 kGy ou moins) : détruit la totalité des germes pathogènes non sporulés. On parle aussi de « radiopasteurisation ».
- La **radurisation** (5 kGy ou moins) : réduit la charge microbienne sans altérer le produit.

La norme générale Codex pour les denrées alimentaires irradiées (CODEX STAN 106-1983, REV. 1-2003) précise que la dose maximale absorbée pour une denrée alimentaire ne doit pas être supérieure à 10 kGy, sauf si cela est nécessaire pour obtenir un résultat technologique légitime.

VII.3.2. Débit de dose

Le **débit de dose** est défini par la dose absorbée par l'aliment, par unité de temps d'exposition. Il s'agit donc de la puissance absorbée que l'on peut exprimer en kW par kg d'aliment ou en kGy par unité de temps.

La **dose d'irradiation** et le **débit de dose** sont liés par la formule suivante :

$$D = D' \cdot t$$

D : Dose d'irradiation ; D' : Débit de dose ; t : Temps d'exposition de l'aliment à la source d'irradiation

VII.4. EFFET DES RADIATIONS IONISANTES SUR LA CONSERVATION DES ALIMENTS

L'**effet des radiations** ionisantes sur les microorganismes est dû surtout à des modifications chimiques de l'ADN et l'ARN qui entraînent une inhibition de la croissance, voir la mort des cellules. En dehors de ces effets directs des radiations ionisantes, viennent s'ajouter les effets indirects liés à la présence des produits de radiolyse comme l'eau oxygénée.

La **cinétique de destruction** des microorganismes par les radiations ionisantes est directement liée à la dose appliquée suivant une loi exponentielle de type :

$$N = N_0 \cdot 10^{-(D/D_{10})} = N_0 \cdot 10^{-[(D' \cdot t)/D_{10}]}$$

N_0 : Nombre initiale de microorganismes ; N : Nombre de microorganismes survivants après application de la dose d'irradiation D ; D' : Débit de dose ; t : Temps d'exposition de l'aliment à la source d'irradiation ; D_{10} : Dose correspondant à la destruction de 90% des cellules de microorganismes.

Tableau XII : Dose d'irradiation pour la réduction décimale de M.O et de Virus :

Espèce	Dose (Krad)
<i>Pseudomonas sp</i>	6
<i>Salmonella sp</i>	70
<i>micrococcus radiodurans</i>	800
<i>Clostridium botulinum (spores)</i>	370
<i>Penicillium sp</i>	40
Virus poliomyélique	1400

Il est évident que pour une dose de radiations donnée, l'efficacité du traitement sera d'autant plus faible que le nombre de microorganismes présents initialement dans le produit sera élevé. Ce traitement ne remet donc nullement en question les mesures habituelles d'hygiène. De plus les radiations ionisantes, aux doses habituellement utilisées, ne permettent pas de détruire les toxines déjà produites par les microorganismes avant le traitement.

Le **facteur D₁₀** caractérise la radiorésistance des microorganismes, mais il est loin de constituer un facteur intrinsèque d'une espèce donnée, comme il est dans le cas des traitements thermiques. En effet, plusieurs études ont montré que, en plus de l'espèce, D₁₀ dépend de plusieurs autres facteurs comme le débit de la dose, la nature des rayonnements ionisants utilisés et la température du traitement.

D'une manière générale, on peut dire que les espèces les plus radiorésistantes sont les bactéries sporulées, suivies des bactéries gram+, lesquelles sont résistantes que les gram-. Les moisissures se situent dans la zone des formes végétatives des bactéries. Quant aux levures, elles sont aussi résistantes que les bactéries les moins radiosensibles.

Les effets des radiations ionisantes ne se limitent pas aux microorganismes présents dans le produit : elles permettent également de désinsectiser les aliments (céréales, légumes secs p.ex.) et de retarder la maturation et/ou la germination des fruits et légumes frais en perturbant le mécanisme enzymatique endogène responsable de la maturation et/ou de la germination.

VII.5. DIFFÉRENTES APPLICATIONS DU TRAITEMENT PAR RAYONNEMENTS IONISANTS

Le traitement ionisant n'a pas pour objectif de remplacer tous les procédés de conservation actuellement employés. L'autorisation de l'application de ce traitement varie selon les pays. Le traitement des épices est de plus en plus répandu. En effet, ces denrées sont très fortement contaminées et il n'existe pas beaucoup d'autres possibilités pour les décontaminer.

Les applications qui sont signalées ci-après sont autorisées uniquement dans quelques pays.

a) **Irradiation des fruits** : * modifie l'activité enzymatique des tissus, * retarde la maturation de certains fruits, * prolonge la durée de l'entreposage à la température ordinaire, * détruit les insectes présents sur ou dans les fruits, * au Maroc, des essais d'irradiation d'orange à titre expérimental se font dans la station (SIBO).

b) **Irradiation des légumes** : * Inhibe la germination des pommes de terre (15 Krad) France, * retarde la détérioration, à température ordinaire, de champignons frais (250 Krad), Pays-Bas.

c) **Irradiation des grains de céréales** : * Détruit les insectes (15 Krad), * réduit les pertes, * éviterait l'emploi de produits antiparasitaires.

d) **Irradiation des Viandes (100 à 200 K rad)** : * Détruit des Pseudomonas et des Achromobacter, * prolonge la durée de l'entreposage réfrigéré, * tue les parasites des viandes, * élimine les salmonella des viandes congelées (600 Krad), des volailles et des oeufs frais (250 Krad).

e) **Irradiation des animaux marins** : * (200 Krad) prolonge de 15 js la durée d'entreposage, de la morue fraîche à 0°C, * (15 à 30 Krad) détruit les insectes présentent dans les poissons salés, séchés ou fumés,

VII.6. EFFETS INDÉSIRABLES DE L'IRRADIATION DES ALIMENTS

L'**irradiation** est une technique de conservation autorisée pour certaines denrées alimentaires. Elle est efficace et permet de remplacer des conservateurs chimiques dangereux pour la santé. Cependant, son utilisation doit être optimisée de telles sortes à profiter pleinement de ses avantages sans que le consommateur soit victime de ses effets indésirables.

Parmi les effets indésirables de l'irradiation des aliments on peut citer :

- La destruction d'une grande partie des vitamines (notamment C et B1) et des nutriments présents dans les aliments.
- L'irradiation bloque les processus de dégradation microbiens et enzymatiques des aliments : une denrée alimentaire, comme une fraise, peut paraître fraîche alors qu'elle ne l'est pas en réalité et qu'elle a perdu beaucoup de ses principes nutritionnels. Le consommateur peut ainsi être induit en erreur parce que l'aspect de la denrée ne correspond pas à l'aspect qu'aurait un fruit non traité ayant le même "âge".
- L'irradiation des aliments conduit à la formation des radicaux libres, produits très réactifs, qui réagissent en formant des produits de radiolyse mal connues, provoquant parfois l'altération des caractéristiques organoleptiques de l'aliment. L'effet indésirable des produits de radiolyse sur la santé humaine n'est pas à écarter, quoiqu'elle ne soit pas encore prouvée.

- L'irradiation des aliments fait appel aux technologies de nucléaire ce qui pose toutes les questions environnementales relatives au recours à ces technologies.

Afin d'informer le consommateur sur les aliments irradiés, la norme Codex pour l'étiquetage des denrées alimentaires préemballées (**CODEX STAN 1-1985**), impose que l'étiquette de tout aliment qui a été traité par des rayonnements ionisants, ou contenant des ingrédients irradiés, doit porter une mention écrite à cet effet. L'emploi du symbole international d'irradiation des aliments, indiqué ci-après, est facultatif, mais lorsque celui-ci est utilisé, il doit figurer à proximité immédiate du nom de l'aliment.



Symbole international d'irradiation des aliments

CHAP. VIII. CONSERVATION PAR HAUTES PRESSIONS

VIII.1. INTRODUCTION

Le **traitement par hautes pressions** (HPP : High Pressure Processing), encore appelé « **Pascalisation** », est un procédé qui consiste à appliquer une pression sur un liquide dans lequel le produit d'intérêt est immergé. Cette pression peut atteindre 6000 fois la pression atmosphérique.

Le traitement par hautes pressions des aliments est également appelé « **pasteurisation à froid** ». Il permet de prolonger la durée de conservation des aliments tout en conservant leurs propriétés nutritionnelles et organoleptiques essentielles.

Les nombreux avantages de ce procédé ont été vantés et mentionnés : une dégradation de la flore bactérienne, aucune modification des vitamines, une faible modification de la couleur et du goût. L'utilisation de ce traitement est donc une alternative au procédé de pasteurisation thermique.

VIII.2. DÉFINITION DE LA PRESSION

Lorsqu'une force s'exerce sur une surface, l'effet engendré s'exprime par le quotient de l'intensité de cette force par unité de surface. Ce quotient s'appelle la pression.

$$\text{Pression (en Pascal)} = \text{Force (en Newton)} / \text{Surface (en m}^2\text{)}$$

Dans le Système International d'unités (S.I), la pression s'exprime en pascal (Pa): 1 Pa = 1 N.m⁻². Il existe d'autres unités de pression, les plus courantes étant l'atmosphère (atm), le bar et le « millimètre de mercure ».

VIII.3. HAUTES PRESSIONS ET CONSERVATION DES ALIMENTS

L'**effet des hautes pressions** sur la conservation des aliments est dû essentiellement à la modification de la structure des constituants cellulaires, notamment les protéines et les membranes cellulaires.

La structure tertiaire des protéines est modifiée pour des pressions au delà de 200 MPa. Au dessus de cette valeur, c'est essentiellement la structure quaternaire des protéines qui est affectée. La conséquence directe de la dénaturation des protéines est la perte de leurs activités biologiques.

Les hautes pressions induisent également des modifications des membranes cellulaires, qui sont l'une des principales causes de mortalité bactérienne, de la morphologie des cellules conduisant à des élongations des cellules, des pertes de mouvements pour les micro-organismes voués à se déplacer et des éclatements de certaines vacuoles intracellulaires.

La pression joue aussi un rôle sur la disponibilité de l'énergie au sein des cellules car elle affecte les réactions biochimiques chargées de produire de l'énergie. Elle peut aussi affecter certaines réactions moléculaires comme l'expression génétique et la synthèse protéique entre 30 et 50 MPa.

VIII.3.1. Effet des hautes pressions sur les microorganismes

Différentes études ont démontré que les hautes pressions sont capables de détruire la plupart des micro-organismes. Mais cela dépend de l'amplitude de la pression, de son temps d'application, de son mode d'application (continu ou fragmenté), du pH du milieu, du type de micro-organismes et enfin de la température du traitement (positive ou négative).

Le traitement par hautes pressions permet alors de pasteuriser différents produits à basse température, et d'augmenter ainsi leur durée de vie (shelf-life), tout en leur conservant des caractéristiques les rendant proches des produits frais. L'optimisation de ce procédé peut aussi se faire par des traitements combinés (pression-température, pression-pH, etc.).

La **cinétique de destruction** des microorganismes par les hautes pressions peut généralement être exprimée par la formule suivante :

$$\text{Log (N)} = \text{Log (N}_0) - (t/D_{10})$$

N_0 : Nombre initiale de microorganismes ; N : Nombre de microorganismes survivants après pressurisation ; t : temps de traitement ; D_{10} : Temps nécessaire, pour une pression donnée, pour réduire de 90% le nombre des microorganismes présents.

La figure 3 donne un exemple de la cinétique de destruction de *Listeria monocytogenes* sous différentes pressions.

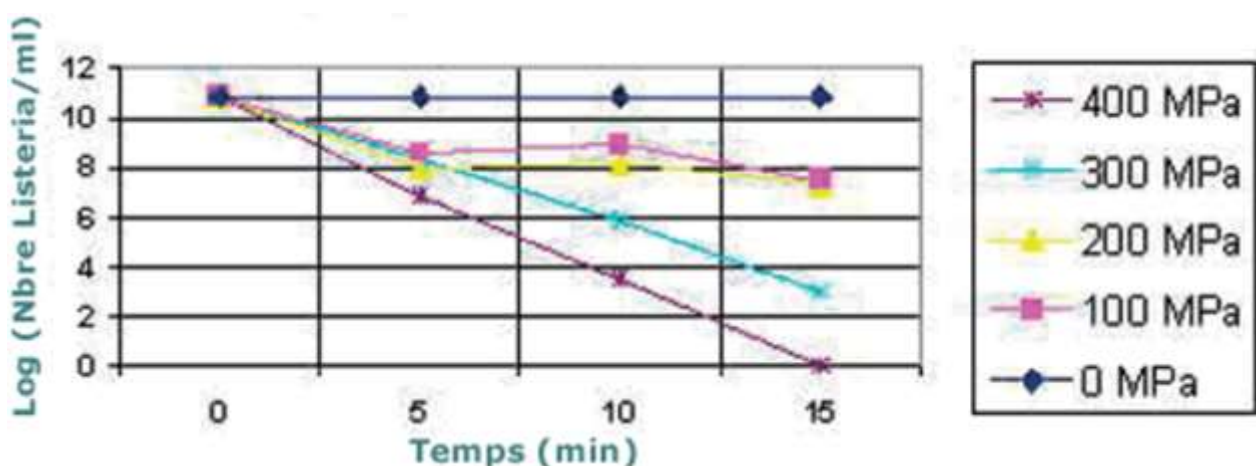


Figure 17 : Effet des hautes pressions sur *Listeria monocytogenes* (culture pure)

En général, les micro-organismes résistants à la température sont aussi résistants à la pression : Les levures et les moisissures sont moins résistantes que les bactéries ; les formes sporulantes sont plus résistantes que les formes végétatives et les bactéries Gram+ sont plus résistantes que

les Gram-. En plus, la présence de sucres et de protéines sur la surface externe des cellules augmente la résistance des micro-organismes face aux hautes pressions.

Les levures et les moisissures sont inactivées par des pressions entre 200 et 300 MPa. La majeure partie des spores de levures ou de moisissures est facilement inactivée par une pression à 400 MPa.

La plupart des bactéries sous forme végétative sont inactivées par des pressions entre 400 et 600 MPa. Par contre les spores bactériennes peuvent résister à des pressions supérieures à 1000 MPa. Néanmoins, un traitement entre 50 et 300 MPa peut induire la germination des spores. Ainsi, le processus pour minimiser la survie des spores consiste en une première pression modérée pour la germination et en une seconde beaucoup plus importante pour les inactiver.

VIII.3.2. Effet des hautes pressions sur les enzymes

L'**effet des hautes pressions sur les enzymes** peut être positif ou négatif. Il est positif lorsque les hautes pressions permettent de désactiver les enzymes ; et il est négatif lorsque les hautes pressions font activer les enzymes au lieu de les désactiver.

L'effet négatif (activation des enzymes) est observé lorsqu'on applique des hautes pressions aux alentours de 100 MPa. En effet, cette gamme de hautes pressions est incapable de dénaturer les protéines constituant les enzymes. Par contre elle peut mettre les enzymes et leurs substrats en contact en modifiant les membranes qui les séparent.

L'effet positif (désactivation des enzymes) est observé lorsqu'on applique des hautes pressions au-delà de 100 MPa. En effet, cette gamme de pression modifie la structure tertiaire et/ou quaternaire des protéines constituant les enzymes, ce qui les rend inactifs.

VIII.4. TECHNIQUES DE PASCALISATION

La **technique de pressurisation** (ou de **pascalisation**) consiste à appliquer une pression sur un liquide qui contient les produits devant subir le traitement. La compressibilité du liquide transmettant la pression est faible. Souvent, le liquide utilisé est l'eau. Il en découle ainsi l'appellation « **hautes pressions hydrostatiques** ».

Le produit est enfermé dans son emballage de vente (souvent un sachet imperméable et flexible), dans lequel le vide a été fait puis submergé sous l'eau. La pression appliquée est isostatique (elle est identique dans toutes les directions de l'espace) en tous points de l'enceinte et donc du produit. Ainsi comprimé, le produit peut reprendre sa forme initiale quand la pression est libérée. La gamme des hautes pressions appliquées varie de quelques dizaines de MPa (méga pascals) à 1 GPa (giga pascal).

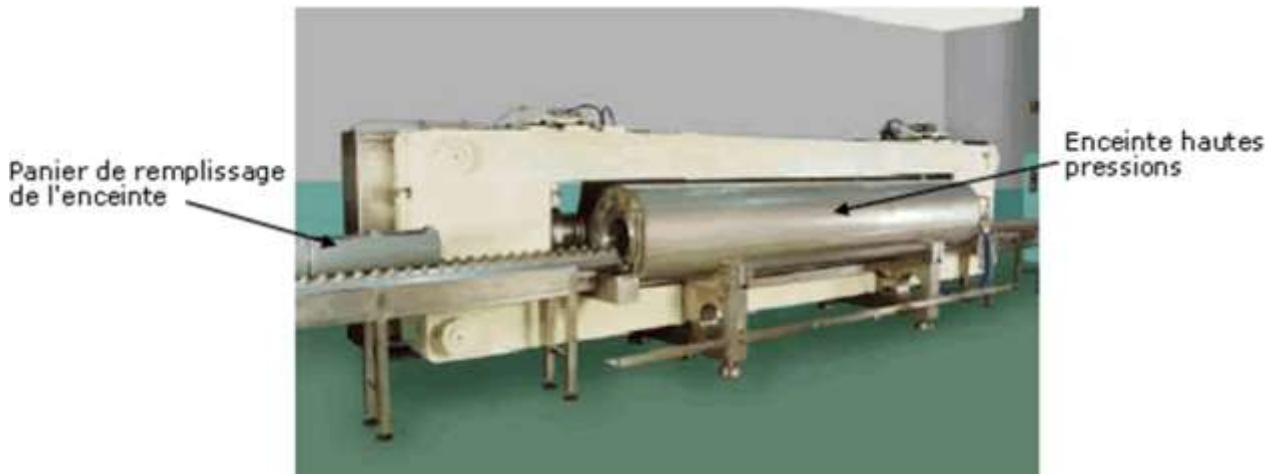


Figure 18 : Enceinte hautes pressions en position horizontale

Ce procédé présente des avantages suivants :

- le traitement par hautes pressions se fait à des températures inférieures à 100 °C et même en général à température ambiante,
- ce traitement requiert beaucoup moins d'énergie que la majorité des autres systèmes de conservation,
- il n'y a aucun gradient de pression dans le produit car la transmission de cette pression se fait instantanément par opposition à un traitement thermique.

L'équipement est composé d'une enceinte résistante à la pression, d'un circuit « hautes pressions », d'une pompe externe de compression du fluide, d'une unité de commande et d'un dispositif de chauffage ou de refroidissement.

Deux types de compressions sont disponibles : la **compression « directe »** et « **indirecte** ».

VIII.4.1. Compression directe

Dans le système de **compression « directe »** (Figure 19), la pression est générée directement à l'intérieur de l'enceinte par la compression d'un piston sur son milieu en contact. Le fluide, ainsi vecteur de la pression, arrive sous basse pression dans l'enceinte ; ensuite le piston permet de générer les pressions. L'avantage de cette méthode, est d'atteindre rapidement des pressions élevées ; mais, elle reste limitée à des enceintes de faible diamètre du fait de problèmes d'étanchéité.

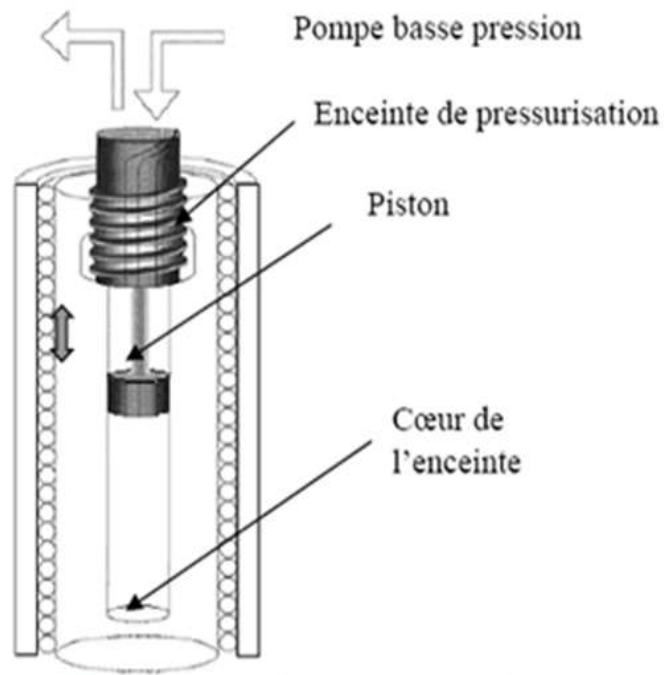


Figure 19 : Principe d'une enceinte hautes pressions à compression directe

VIII.4.2 Compression indirecte

La deuxième possibilité est la **compression** « **indirecte** ». Dans ce cas, une pompe « hautes pressions » envoie un fluide de pressurisation dans une enceinte close (Figure 20). Cette méthode est la plus répandue dans les industries.

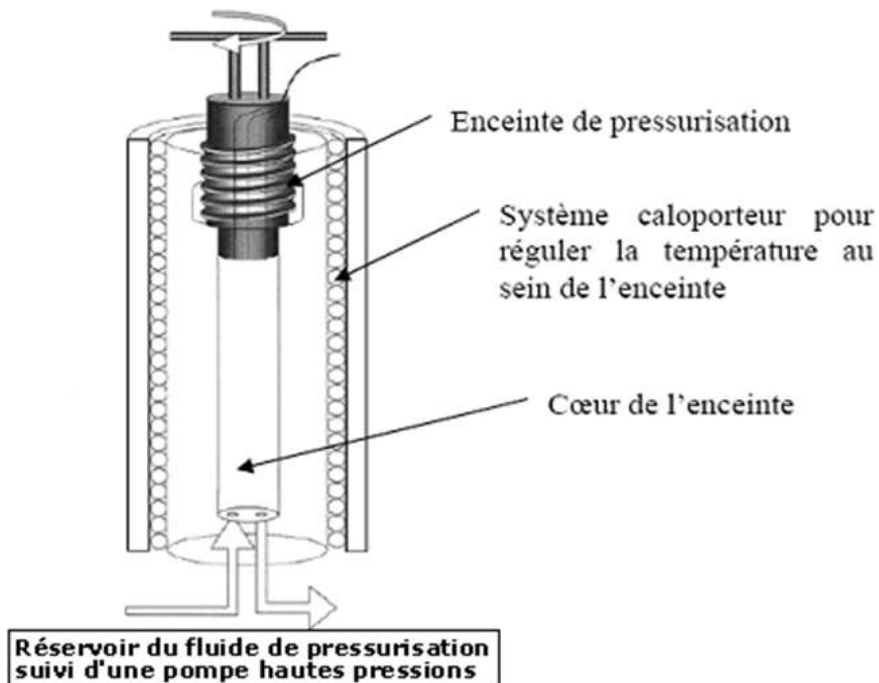


Figure 20 : Principe d'une enceinte hautes pressions à compression indirecte

CHAP IX. CONSERVATION PAR CHAMP ELECTRIQUE

Le traitement par **champ électrique** implique le passage d'un voltage très élevé dans l'aliment placé entre deux électrodes. Le champ électrique est normalement appliqué à température ambiante ou réfrigérée pendant moins d'une seconde. L'inactivation des bactéries qu'il produit peut être expliquée par des modifications structurelles des membranes et par l'apparition de pores.

Au cours de ce traitement, il n'y a pas ou peu d'échauffement de l'aliment ; son aspect, ses caractéristiques physico-chimiques et nutritionnelles sont maintenues intactes.

Ce traitement peut s'envisager pour des aliments liquides : jus d'orange, jus de pomme, lait, etc.

CHAP X. CONSERVATION PAR VOIE CHIMIQUE

X.1. INTRODUCTION

L'utilisation des substances chimiques pour la conservation des denrées alimentaires a commencé quand l'homme a appris à protéger chaque récolte jusqu'à la récolte suivante.

Ces 50 dernières années, les développements scientifiques dans l'alimentation et les avancées technologiques ont abouti à la découverte de nouveaux additifs alimentaires utiles pour la conservation des aliments contre les dégradations et les altérations dues aux réactions chimiques (oxydation non enzymatique, dégradation des vitamines et des acides aminés, etc.), biologiques (oxydation enzymatique et autres dégradations par voie enzymatique) et microbiologiques.

Les additifs qui remplissent cette fonction de conservation des aliments sont classés en deux catégories principales : Les conservateurs et les antioxydants.

X.2. CONSERVATEURS

Les **conservateurs** sont des substances qui limitent, ralentissent ou stoppent la croissance des microorganismes (bactéries, levures, moisissures) présents ou entrant dans l'aliment et préviennent donc l'altération des produits ou les intoxications alimentaires. Ils sont employés entre autres dans les aliments cuits, le vin, le fromage, les jus de fruits et les margarines.

Le nombre E des conservateurs autorisés actuellement au niveau de l'union européenne va de **E 200 à E 297**. Le tableau XII donne quelques exemples des conservateurs les plus utilisés.

Tableau XII : Exemples des conservateurs les plus couramment utilisés

Nombre E	Substance/Classe	Exemples de denrées alimentaires dans lesquels ils sont utilisés
E 200 - 203	Acide sorbique et sorbates	Employés contre moisissures à pH < 5 dans Fromages, vins, fruits séchés, purées de fruits, garnitures
E 210 - 213	Acide benzoïque et benzoates	Légumes au vinaigre, confitures et gelées à faible teneur en glucides, fruits confits, semi-conserves de produits de la pêche, sauces
E 220 – 228	Dioxyde de soufre et sulfites	Inhibent la croissance bactérienne dans les fruits secs, fruits en conserve et vins. Ils ont aussi des propriétés antioxydantes et sont des inhibiteurs du BNE
E 235	Natamycine	Traitement de surface des fromages et des saucissons
E 249 – 252	Nitrites et nitrates	Employés dans les préparations à base de viandes (jambon, saucissons, foie gras, etc.) pour empêcher la croissance du <i>Clostridium botulinum</i> .
E 282	Propionate et ses sels de Na et de Ca	Prévient le développement des moisissures sur le pain et les aliments cuits.

X.3. ANTIOXYDANTS

Les **antioxydants** sont des molécules qui aident à protéger les aliments contre les réactions d'oxydation qui accélèrent le vieillissement. Il peut s'agir d'altérations dues à l'oxygène de l'air, à la lumière, aux traces de métaux ou à certaines enzymes. Les **antioxydants** regroupent la catégorie des antioxygènes et celle des séquestrants.

L'acide ascorbique (ou vitamine C), contenu dans de nombreux agrumes, est fréquemment utilisé dans les cuisines et dans la production alimentaire pour empêcher l'oxydation des aliments (changement de couleur des fruits et légumes fraîchement épluchés ou découpés). La vitamine C et ses divers sels sont aussi ajoutés pour protéger les boissons non alcoolisées, les confitures, le lait concentré et les saucissons.

Les tocophérols, qui font partie de la famille de la vitamine E, sont un autre exemple d'**antioxydants naturels**. On les trouve principalement dans les noix, les graines de tournesol, les pousses de soja et de maïs et ils sont le plus souvent utilisés pour conserver les huiles végétales, la margarine et les produits à base de cacao.

L'acide ascorbique et les tocophérols étant des antioxydants très employés et les besoins ne pouvant être couverts entièrement à partir de sources naturelles, ces deux composés sont aussi produits par synthèse depuis quelque temps. Il est maintenant possible de copier leur structure moléculaire de façon si parfaite qu'il n'existe plus aucune différence ni dans leur structure ni dans leurs effets. En d'autres termes, ces substances « **identiques aux naturelles** » sont globalement identiques à leurs originaux.

Les **antioxydants artificiels** sont tout aussi utilisés que les **antioxydants** « **naturels** » et ceux « **identiques aux naturels** ». Les principaux appartiennent au groupe des gallates (**E 310-312**). Les gallates sont ajoutés principalement aux huiles végétales et à la margarine pour les empêcher de rancir et pour préserver leur goût.

Le tableau XIII donne quelques exemples d'antioxydants les plus couramment utilisés.

Tableau XIII : Exemples d'antioxydants les plus couramment utilisés

Nombre E	Substance/Classe	Exemples de denrées alimentaires dans lesquels ils sont utilisés
E 300-302	Acide ascorbique, Ascorbate de sodium, Ascorbate de calcium	Boissons non alcoolisées, confitures, lait concentré, saucisson, maintiennent la couleur des fruits et légumes fraîchement épluchés ou découpés
E 304	Palmitate d'ascorbyle	Saucissons, bouillon de poule
E 306-309	Tocophérols	Huiles et graisses végétales
E 310-311	Gallates, Octyl gallate	Graisses et huiles destinées à la production

		professionnelle, huiles et graisses de friture, assaisonnements, soupes déshydratées, chewinggum
E 320-321	BHA (Butyl hydroxyanisole), BHT (Butyl hydroxytoluène)	Bonbons, raisins secs, fromage fondu, beurre de cacahuètes, soupes instantanées

X.4. AUTRES AGENTS DE CONSERVATION PAR VOIE CHIMIQUE

De nombreuses autres applications, en cours de développement, reposent sur l'utilisation de substances présentes naturellement (elles sont donc plus facilement acceptées par le consommateur) dans les organismes animaux et végétaux, voire dans les microorganismes, et présentant des propriétés antimicrobiennes ou antioxydantes. **Le lysozyme**, par exemple, présent dans des liquides corporels et jusqu'à une teneur de 3,5% dans la matière sèche du blanc d'œuf fait déjà l'objet d'applications commerciales : il est considéré comme additif (**E 1105**) puisqu'il est ajouté lors de la transformation des denrées alimentaires. Il lyse les formes végétatives de nombreuses bactéries gram+ mais il est inactif contre les bactéries gram- (leur membrane externe empêche le lysozyme d'accéder aux peptidoglycans sous-jacents qui sont le substrat de cet enzyme). Parmi les substances présentant des propriétés antimicrobiennes ou antioxydantes exploitables, on citera encore quelques exemples :

- d'origine animale : la lactoperoxydase (présente dans le lait, le colostrum, la salive, ...);
l'ovotransferrine (dans l'œuf), la lactoferrine (dans le lait) ;
- d'origine végétale : composés phénoliques présents dans de nombreux épices, acides organiques présents dans de nombreux végétaux.

CHAP XI. CONSERVATION PAR COMBINAISON DE PLUSIEURS TECHNIQUES

Actuellement, l'augmentation de la durée de la conservation d'une denrée alimentaire est souvent obtenue par la combinaison de plusieurs techniques de conservation qui, prises séparément, ne produisent pas un effet suffisant pour empêcher le développement des microorganismes ou l'action d'enzymes. Cet effet de synergie peut être objectivé et exploité dans certaines techniques de fabrication ou de conservation des aliments.

Comme exemples de combinaison de plusieurs techniques de conservation, on peut citer : La combinaison pasteurisation-réfrigération, salage-séchage, séchage-fumage, salage-fumage, atmosphère modifiée- réfrigération, etc.