

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche Scientifique



Université A /Mira de Bejaia
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Alimentaires

La conservation des Aliments

Mme METTOUCHI- TAMENDJARI Soraya.

Maitre de Conférences à l'Université de Bejaia

2020- 2021

Table des matières

Préface

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction 1

1/ Qu'est-ce que conserver un aliment ? 1

2/ Facteurs d'altération de la qualité des aliments 2

Chapitre I : La conservation par traitements thermiques

I.1/ Les traitements thermiques : La conservation par la chaleur 5

I.1.1/ Principe et mode d'action de la chaleur 5

I.1.2/ Optimisation des traitements thermiques 6

I.1.2.1/ Cinétique de destruction des microorganismes par la chaleur 7

I.1.2.2/ Mode de pénétration de la chaleur et calcul des barèmes temps/ Température 14

I.1.2.3/ La cuisson (contraintes organoleptiques et nutritionnelles) 15

I.2/ Les différents traitements thermiques 17

I.2.1/ La thermisation 17

I.2.2/ La pasteurisation 17

I.2.2.1/ Technologies de pasteurisation 18

I.2.2.2/ Etude des différentes installations de pasteurisation 20

I.2.2.2.1/ Les différentes sections d'un pasteurisateur 20

I.2.2.2.2/ Les catégories d'échangeurs 21

I.2.3/ Stérilisation / Appertisation 25

I.2.3.1/ Principe de fonctionnement d'un autoclave 26

I.2.3.2/ Influence de la Stérilisation sur la qualité du produit alimentaire 27

I.3/ Technologie des traitements thermiques en vrac 29

I.6.1/ Mise en œuvre d'un traitement thermique en vrac 29

I.6.1.1/ Cas des produits liquides à visqueux 29

I.6.1.2/ Cas des produits solides immergés dans une phase liquide 30

Chapitre II : La conservation par le froid

II.1/ La réfrigération (Froid positif) 32

II.1.1/ Action du froid positif 32

II.1.2/ Evolution de la microflore au cours de la réfrigération 32

II.1.3/ Les paramètres influençant l'activité bactérienne au cours de la réfrigération 33

II.1.4/ Caractéristiques des produits réfrigérés 35

II.1.5/ Systèmes et techniques de refroidissement 35

II.1.5.1/ Les systèmes de refroidissement 35

II.2/ La Congélation (Froid négatif)	37
II.2.1/ Action du processus de congélation sur les microorganismes	38
II.2.2/ Les étapes de la congélation.....	38
II.2.3/ Influence de la vitesse de congélation	38
II.2.4/ Effets de la congélation sur l'aliment	40
II.2.4.1/ Modifications physico-chimiques	40
II.2.4.2/ Modifications biochimiques	41
II.2.5/ Conséquences de l'entreposage sur les aliments congelés	41
II.2.6/ Les techniques de congélation industrielles	42
II.2. 7/ La Décongélation	44
II.2.7.1/ Techniques de décongélation.....	44

Chapitre III : La déshydratation des aliments

III.1/ Intérêts de la déshydratation.....	47
III.2/ Conséquences physico-chimiques de la déshydratation poussée de l'aliment.....	47
III.3/ Les Voies de déshydratation des aliments.....	48
III.4/ Séchage par atomisation.....	48
III.4.1/ Procédés utilisés pour l'atomisation	49
III.4.1.1/ Séchage sur tambours ou cylindres (Procédé Hatmaker)	49
III.4.1.2) Séchage par atomisation : ou procédé Spray	50
III.4.2/ Facteurs influençant l'opération de séchage par atomisation.....	58
III.5/ Avantages et inconvénients du procédé d'atomisation	59
III.6/ Principe de la lyophilisation	60
III.6.2/ Cycle de la lyophilisation.....	62
III.6.3/ Autres techniques de lyophilisation	64
III.6.4/ Conséquences de la lyophilisation sur la qualité des aliments.....	65

Chapitre IV : La conservation par irradiation

IV.1 Introduction/ Historique	67
IV.2/ Définition	67
IV.3/ Les doses d'ionisation et les domaines d'application.....	68
IV.4/ Nature des radiations utilisées.....	68
IV.5/ Installation d'ionisation	69
IV.6 / Mécanismes d'action des rayonnements.....	70
IV.6.1/ Effet des rayonnements sur le milieu	71
IV.6.3/ Effets biologique	72
IV.7/ Effet de l'ionisation sur la qualité des aliments	73
IV.8/ Détection des aliments ionisés	76

Série de TD

Références bibliographiques

Préface

Les produits alimentaires subissent, naturellement, lors du stockage des transformations biochimiques, leur faisant perdre leur qualité nutritionnelle, organoleptique et sanitaire. Pour préserver leur qualité, et prolonger leur durée de conservation il est nécessaire de stabiliser les aliments en contrôlant les réactions conduisant à leur altération. Cette démarche nécessite l'application, aux aliments, des traitements de conservation basés sur des procédés physiques et/ ou chimiques.

La conservation des aliments, qui a été un souci majeur pour l'homme à travers le temps, vise à préserver le plus longtemps possible la qualité des aliments en supprimant ou en ralentissant leur altération pour en assurer une meilleure disponibilité. Certaines techniques de conservation sont très anciennes (le séchage au soleil, la fumaison, la cuisson, le salage ou l'acidification). D'autres ne se sont répandues que grâce au développement des procédés technologiques apparus au cours de l'ère industrielle. Le principe de ces méthodes est le même, il s'agit de bloquer un ou plusieurs des facteurs intrinsèques ou extrinsèques qui favorisent le développement des microorganismes ou des mécanismes d'altération non microbiennes.

Les méthodes ancestrales furent les seules à être utilisées jusqu'au 19^{ème} siècle lorsque NICOLAS APPERT découvrit l'appertisation, 50 ans après LOUIS PASTEUR découvre que le chauffage détruit les microorganismes. Grâce aux progrès accomplis ces dernières années, d'autres techniques ont vu le jour : La congélation, la lyophilisation, l'emballage sous vide, l'ionisation, ...

En milieu industriel, la préservation de la qualité totale des aliments est une démarche cruciale basée sur l'application de divers traitements technologiques. Mais, cette démarche est très délicate, en considérant la sensibilité des composants des produits alimentaires aux méthodes de conservation utilisées.

Ce polycopié a pour objectif la mise en avant des techniques de conservation des aliments, la maîtrise du, de l'aspect technologique sont très importants pour faire un choix judicieux du procédé de conservation qui doit tenir compte de la composition de l'aliment.

Pour certains aliments vulnérables (riches en vitamines, en protéines...), les traitements de conservation appliqués peuvent s'avérer préjudiciables aux qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits traités.

Le présent document décrit de façon pédagogique et synthétique les différents procédés permettant la conservation des aliments, il aborde le principe des différentes méthodes de conservation, l'aspect technologique permettant l'application de ces procédés mais aussi les modifications que peuvent engendrer ces traitements sur la composition et la qualité des aliments. Il est conçu comme support didactique destiné essentiellement aux étudiants Master 2 QPSA et PTL mais aussi de la filière des Sciences alimentaires et aux étudiants poursuivant un parcours de formation en Sciences alimentaires.

Le document comporte de nombreuses illustrations des différentes installations et appareillages qui seront d'un apport judicieux à l'étudiant pour une meilleure compréhension et utilisation pratique des procédés de conservation.

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1 : Réactions d'altération des aliments et croissance des microorganismes induite par l'activité de l'eau dans les aliments.....	3
Figure I.1 : Courbe du suivi du nombre de survivants au cours d'un traitement thermique.....	7
Figure I.2 : Courbe de survie	9
Figure I.3 : Courbe de survie précisant le temps de réduction décimale (D)	9
Figure I.4 : Courbe de durée thermique mortelle « Courbe TDT », pour Treatment Death Time	12
Figure I.5 : Courbe de pénétration de la chaleur dans les produits.....	14
Figure I.6 : Installation d'un pasteurisateur	20
Figure I.7 : Principe de circulation d'eau et de produit dans un pasteurisateur à plaque	21
Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaque	22
Figure I.9 : Représentation schématique d'un échangeur en spirale.....	23
Figure I.10 : Circulation des fluides dans les différents types d'échangeurs tubulaires	24
Figure I.11 : échangeur à surface raclée	24.
Figure I.12 : Evolution de la température dans un autoclave	27
Figure I.13 : Principe de fonctionnement de la stérilisation du lait par UHT	30

Chapitre II

Figure II.1 : Courbe représentant l'évolution de la flore du lait au cours de la réfrigération .	33
Figure II. 2 : Courbes théoriques de réfrigération de la viande bovine	34
Figure II.3 : Schéma d'une installation de refroidissement à détente direct (a) et d'un système indirect de refroidissement (b)	36
Figure II.4 : Les phases de congélation.....	39

Chapitre III

Figure III.1 : Principe du séchage sur tambours à deux	50
Figure III.2 : Le système de séchage ouvert	51
Figure III.3 : Les cycles de séchage clos et semi-clos.....	52

Figure III.4 : Le cycle de séchage aseptique	52
Figure III.5 : Sécheur vertical à pulvérisation	53
Figure III.6 : Constitution d'un atomiseur rotatif.....	53
Figure III.7 : Quelques exemples de buses pneumatiques	54
Figure III.8 : Types de chambres de séchage à co-courant	55
Figure III.9 : Chambre de séchage à contre-courant	56
Figure III.10 : Chambre de séchage à flux mixte	56
Figure III.11 : Sécheur horizontal à pulvérisation.....	57
Figure III.12 : Installation d'atomisation à lit fluidisé	57
Figure III.13 : Courbe de vitesse de séchage.....	58
Figure III.14 : Diagramme représentatif des différents états de l'eau	61
Figure III.15 : Système typique de lyophilisation	61

Chapitre IV

Figure IV.1 : Installation d'ionisation.....	70
Figure IV.2 : Interaction des rayonnements ionisants avec la matière.....	71

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1 : Valeurs d'aw favorables pour le développement microbien.....	3
Tableau I.1 : Les températures minimales, optimales et maximales de quelques groupes de bactéries.....	6
Tableau I.2 : Valeurs de temps de réduction décimales pour quelques espèces Bactériennes	10
Tableau I.3 : Valeurs du facteur d'inactivation thermique (Z) et du temps de réduction décimal (D) pour quelques espèces bactériennes	13
Tableau I.4 : Exemples de modes de pasteurisation appliqués aux aliments	19
Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des différents échangeurs	25
Tableau I.6 : Traitements utilisés pour la stérilisation des aliments.....	26

Chapitre II

Tableau II.1 : Durée maximale de stockage des produits alimentaires (en mois)	40
Tableau II.2 : Principaux procédés de congélation.....	43

Chapitre III

Tableau III.1 : Propriétés de la poudre de lait séchée sur cylindre et par atomisation (Valeur maximale)	59
---	----

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Doses de réduction décimale de quelques microorganismes	73
Tableau IV.2 : Effets des radiations sur les produits alimentaires.....	75

Introduction

Les produits alimentaires consommés qu'ils soient d'origine animale ou végétale subissent, naturellement au cours de leur stockage, des altérations d'origine microbiologiques ou enzymatiques. Ces altérations provoquent des modifications de texture, de couleur et de goût, rendant très vite ces aliments impropres à la consommation, en leur faisant perdre leur qualité nutritionnelle et organoleptique. Ces altérations peuvent même être à l'origine de pathologies graves. Les caractéristiques d'un aliment influent sur son aptitude à la conservation. Ces dernières sont soit intrinsèques (inhérentes à l'aliment) soit extrinsèques (propriétés de l'environnement). Ainsi, pour préserver la qualité des aliments et prolonger leur durée de vie, il est impératif de les stabiliser. Cette démarche nécessite l'application aux aliments des traitements de conservation basés sur des procédés chimiques ou physiques.

La conservation des aliments est une technique très ancienne qui vise à assurer le plus longtemps possible la qualité des aliments. Ces techniques de conservation vont des plus anciennes (séchage au soleil, fumaison, salage). D'autres ne se sont répandues que grâce aux progrès technologiques. Le principe de ces méthodes est le même, il s'agit de modifier un ou plusieurs des facteurs intrinsèques ou extrinsèques qui déterminent le développement des microorganismes ou des mécanismes d'altération non microbiennes. Seules les techniques de conservation se sont sophistiquées au fur et à mesure que les progrès de la science le permettent. Actuellement la bonne conservation d'un aliment résulte d'une optimisation réussie entre les impératifs : durée (marketing et distribution), facteurs scientifiques et technologiques (impératifs de recherche et de développement), coût (impératifs économiques et commerciaux), qualité de l'aliment (impératifs réglementaire et exigences du consommateur).

1/ Qu'est ce que conserver un aliment ?

La conservation consiste à maintenir le plus longtemps possible le plus haut degré de qualité (propriétés gustatives et nutritives) de la denrée alimentaire en agissant sur les mécanismes d'altération pour en ralentir ou en supprimer les effets. Ce qui revient à préserver les qualités hygiénique, nutritionnelle et sensorielle et technologique. Les différents procédés de conservation ont permis :

- ✓ Une meilleure disponibilité des produits ;

- ✓ Une réduction importante des pertes ;
- ✓ Une meilleure régulation de l'alimentation de l'Homme ;
- ✓ Une diminution du taux de pathologies causées par les microorganismes.

Dans de très nombreux cas, c'est l'objectif même de la conservation qui a conduit dans le passé à formuler des produits nouveaux tels : les confitures (conservation des fruits), les yaourts et fromages (conservation du lait), salage et fumage (conservation des viandes). Au point où l'on est venu à considérer ces formes de conservation comme des produits en tant que tel dont on cherche à présents par différents moyens (notamment par l'emballage) à allonger encore plus la durée de vie.

2/ Facteurs d'altération de la qualité des aliments

L'altération d'un aliment est toute modification subite par rapport à sa constitution spécifique, ce qui diminue sa valeur nutritionnelle et le rend impropre à la consommation. Plusieurs facteurs peuvent favoriser l'altération des aliments :

2.1/ Facteurs intrinsèques

a) Activité de l'eau

L'activité de l'eau (a_w) influe sur la vitesse de dégradation des aliments en modifiant l'activité des microorganismes et celles des enzymes. La variation de la vitesse de dégradation des aliments en fonction de l'activité de l'eau est illustrée dans la figure n°1. La connaissance des valeurs de l' a_w permet de prévoir quels types de microorganismes sont capables de détériorer l'aliment. Le tableau 1 suit donne les valeurs d' a_w favorables à l'activité microbienne des aliments.

b) pH : Les aliments acides sont naturellement protégés des attaques microbiennes, à l'exception de quelques levures et moisissures. En revanche, les aliments à pH neutre sont plus favorables aux développements microbiens. Les plages de croissances retenues sont :

- pour les moisissures : pH entre 1,5-2 et 11 avec un optimum de 7
- pour les levures : pH entre 2,5 et 8,5 avec un optimum de 6,5
- pour les bactéries : pH entre 3,8 et 9 avec un optimum de 7

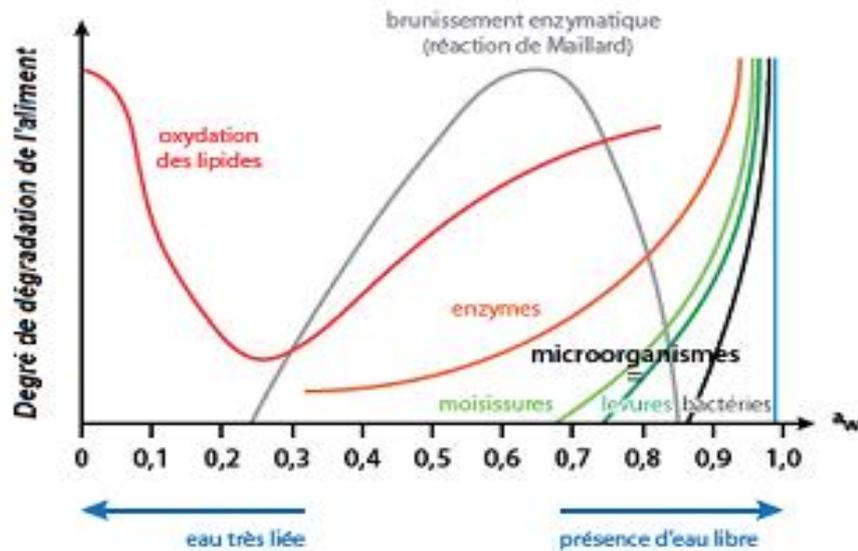


Figure 1: Réactions d'altération des aliments et croissance des microorganismes induite par l'activité de l'eau dans les aliments.

Tableau 1 : Valeurs d' a_w favorables pour le développement microbien.

Valeur A_w	Micro-organismes	Produits alimentaires
1.00-0,95	<i>Pseudomonas, Escherichia, Bacillus, Clostridium...</i>	Fruits, légumes, viande, poisson, laitage, aliments sucrés ou salés ...
0,95-0,91	<i>Salmonella, C. botulinum ...</i> moississures, levures.	Fromages (cheddar), viande fumée, concentrés de jus de fruits ...
0,91-0,80	<i>Staphylococcus aureus</i> Levures (<i>Candida, Torulopsis...</i>) et moisissure (<i>Penicillium</i>),	Concentrés de jus de fruits, flans, fromages secs, margarine, aliments sucrés ou salés ...
0,80-0,60	Bactéries halophiles, moisissures xérophile, levures osmophiles	Pâte d'amande, fruits confits, miel, nougats, bouillies, fruits secs, ...
0,60-0,20	Croissance microbienne très faible	Pâtes alimentaires, épices, poudre de lait, fruits secs, céréales, biscuits...

- c) **Potentiel d'oxydo-réduction (E) :** Ce paramètre indique la disponibilité de l'oxygène de l'aliment. En règle générale, Les micro-organismes aérobies tolèrent des potentiels $E > 200$ mV Tandis que les micro-organismes anaérobies tolèrent des potentiels $E < -200$ mV.
- d) **Agents antimicrobiens naturels :** dans certains aliments existent des agents inhibiteurs de germes, exemple du lysozyme du lait.

2.2/ Facteurs extrinsèques

- a) **Température et humidité relative** : Une température optimale (dépend de la nature des germes) et une humidité relative élevée favorisent le développement microbien.
- b) **Présence de gaz** : La présence d'oxygène favorise le développement de la flore superficielle de contamination. Un excès en CO₂, permet d'abaisser le pH et de limiter la croissance de certains agents microbiens.

3/ Les types d'altération des aliments

Sont distinguées :

- a) **les altérations physiques** : survenant suite à des chocs, des blessures, les modifications d'état, la variation de la teneur en eau, ...
- b) **les altérations biologiques** : dues à la prolifération des microorganismes tels les bactéries (pathogènes comme les salmonelles ou saprophytes telle *E. coli*) ou de champignons, surtout les moisissures (*Penicillium*, *Aspergillus*). Ces microorganismes sont responsables de fermentations altérants la qualité des aliments ou de la production de toxines (telle que la toxine botulinique ou staphylococcique) et d'enzymes telles que la peroxydase
- c) **Les altérations biochimiques** : par les enzymes présentent naturellement dans l'aliment et qui sont responsable d'un brunissement enzymatique et de la dégradation des vitamines (vitamine C), mais aussi de l'oxydation enzymatique des lipides (par action de la lipoxygénase) et de la lipolyse ou hydrolyse des lipides (par action des lipases).
- d) **Les altérations chimiques** : représentées principalement par la réaction de Maillard, responsable de la détérioration de la qualité nutritionnelle et organoleptique des aliments. L'oxydation des lipides insaturés (en présence d'oxygène et d'ions métalliques) est à l'origine de la dégradation des propriétés biochimiques, organoleptiques et nutritionnelles de l'aliment.

I.1/ Les traitements thermiques : La conservation par la chaleur

Souvent appliqué aux aliments dans une phase ultime de préparation avant la consommation. Sous ce titre, nous englobons les procédés de destruction par la chaleur (pasteurisation, stérilisation, blanchiment,...).

Le traitement thermique est appliqué pour :

- ✓ Détruire les microorganismes
- ✓ Stopper l'altération du produit liée à des enzymes endogènes (lipolytiques ou protéolytiques)
- ✓ Améliorer la qualité organoleptique des produits (nitrosomyoglobine : couleur rose caractéristique du jambon cuit, ou réaction de Maillard (générant des nitrosamines responsables de la couleur brune appréciée du pain).
- ✓ Stabiliser la structure de certains produits (par dénaturation des protéines).

I.1.1/ Principe et mode d'action de la chaleur

Chaque microorganisme a une température optimale de croissance. Les taux de croissance aux températures minimale et maximale de croissance sont toujours inférieurs à celui de la température optimale. La température de destruction est située juste au dessus de la température maximale de croissance.

Exple : Pour *Bacillus subtilis*, la température maximale de croissance est de 54°C. La température de destruction est de 55°C.

L'application de la chaleur à une température donnée pendant un temps bien défini entraîne « la mort » de la cellule bactérienne. La notion en microbiologie de la mort signifie l'incapacité du microorganisme à se reproduire ou à se développer dans des conditions favorables. Les mécanismes d'action de la chaleur sur les microorganismes s'expliquent par :

- ✓ La dénaturation des protéines : les enzymes se dénaturent irréversiblement lorsqu'un traitement thermique d'un certain degré est appliqué. Les altérations qui surviennent dans le fonctionnement de certaines enzymes peuvent entraîner la perte du pouvoir de synthèse de facteurs essentiels de croissance.

- ✓ Auto-intoxication : Lorsque la température s'élève, la vitesse des activités métaboliques augmente. L'augmentation ininterrompue de cette vitesse pourrait induire la production de métabolites toxiques empoisonnant le microorganisme lui-même.
- ✓ Action sur les lipides : la fusion, sous l'effet de la chaleur, des lipides constitutifs de la membrane conduit à la perturbation du transport membranaire et à la désintégration des cellules.

I.1.2/ Optimisation des traitements thermiques

L'optimisation des traitements thermiques nécessite :

- 1) La connaissance de la cinétique de destruction des microorganismes par la chaleur et les paramètres caractérisant leur résistance.
- 2) La connaissance de la cinétique de pénétration de la chaleur dans le produit traité et des propriétés thermiques du produits
- 3) La connaissance des cinétiques des réactions secondaires accompagnant la destruction thermique des microorganismes : destruction des enzymes, décoloration ou de brunissement.

Les barèmes de températures minimale, optimale et maximale pour des groupes d'espèces bactériennes sont donnés dans le tableau qui suit :

Tableau I.1: Les températures minimales, optimales et maximales de quelques groupes de bactéries

	T _{min}	T _{opt}	T _{max}
Thermophiles	25- 45°	50- 55°C	70-90°C
Mesophiles	10- 25°C	20- 45°C	35- 50°C
Psychrophyles	0- 5°C	10°C	20°C

❖ Facteurs influençant sur la thermorésistante

- Résistance intrinsèque;
- Facteurs d'environnement qui intervient pendant la croissance des microorganismes et/ ou leur sporulation. Exple : la présence de Ca⁺⁺ augmente la thermorésistante des spores,

- Facteurs qui interviennent au cours du traitement thermique, tel le pH : les aliments à $\text{pH} > 4,5$ nécessitent un traitement thermique assurant une large gamme de protection vis-à-vis de *Clostridium botulinum*. Pour les aliments dont le pH est inférieur à cette valeur, le traitement est de 85 à 100°C ;
- L'activité de l'eau : La thermorésistance augmente quand l'activité de l'eau diminue ;
- Présence dans le milieu d'antiseptique diminue la thermorésistance ;
- La température: La température du milieu dans lequel sont produites les spores, influence beaucoup sur leur thermorésistance.

I.1.2.1/ Cinétique de destruction des microorganismes par la chaleur

a) Cinétique de destruction de la charge microbienne

Les produits alimentaires livrés à la consommation doivent être dépourvus de pathogènes et leur charge en germes d'altération doit être réduite à un niveau toléré par les normes en vigueur. Le traitement thermique ne vise pas la stérilité absolue de l'aliment mais plutôt la salubrité qui est définie par la stérilité commerciale.

On détermine, à différents temps, le nombre de micro-organismes survivants suite à l'exposition à une température létale constante. La figure I.1 suivante montre l'allure de la courbe : $N = f(t)$

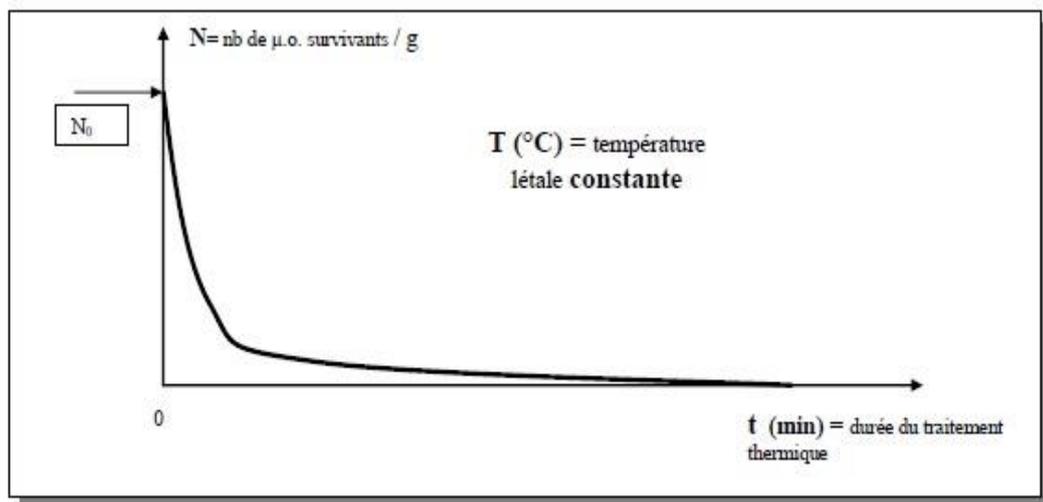


Figure I.1 : Courbe du suivi du nombre de survivants au cours d'un traitement thermique.

Si on étudie l'évolution d'une suspension homogène d'un microorganisme en culture soumis à un traitement thermique pendant un temps « t » létal, on constate que les microorganismes sont détruits progressivement et que la réduction de la population obtenue, après un temps de traitement « t », est directement proportionnel au nombre de microorganismes. On peut écrire :

$$dN/dt = -KN.$$

Avec : K : Vitesse relative de destruction thermique (min^{-1})

dN/dt : Variation du nombre de microorganismes en fonction du temps

N : Nombre de microorganismes viables au temps « t »

D'après la figure représentant la courbe de survie, il apparaît que plus le nombre initial de micro—organismes (N_0) est important, plus le temps de pasteurisation doit être long. De même, plus les micro-organismes sont thermorésistants, plus la durée de pasteurisation doit être grande.

Etant donné que la destruction dépend des germes initialement présents et qu'elle soit aussi liée au temps de traitement, la qualité microbiologique de la matière première est donc primordiale pour obtenir un produit de bonne qualité.

On a : $dN/dt = -KN.$

En multipliant par dt/N : $dN/N = -kdt$

$$\int dN/N = -K \int dt$$

$$\text{Ln } N_2 - \text{Ln } N_1 = -K (t_2 - t_1) \quad \text{d'où : } -K = (\text{Ln } N_2 - \text{Ln } N_1) / t_2 - t_1$$

Il ressort que : **$\log N / N_0 = -K/2,30 \cdot t$**

Cette équation représente la courbe de germes ayant survécus au traitement thermique à chaque instant « t ».

De ce fait, si on utilise la variation du logarithme de la concentration des cellules vivantes en fonction du temps : **Log N = f(t)** ; on obtiendra une droite appelé « **Courbe de survie** » (**figure I.2**):

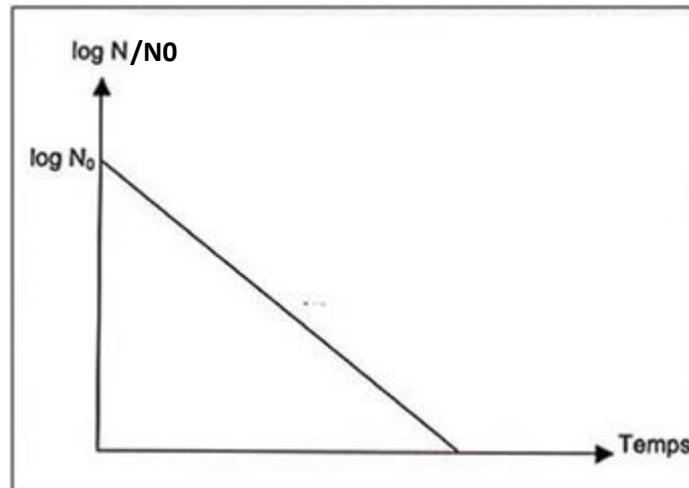


Figure I.2 : Courbe de survie

❖ **Durée de réduction décimale**

On appelle « durée ou temps de réduction décimale », le temps de traitement nécessaire qui permet de diviser par 10 (réduction de 90%) la population microbienne (figure I.3).

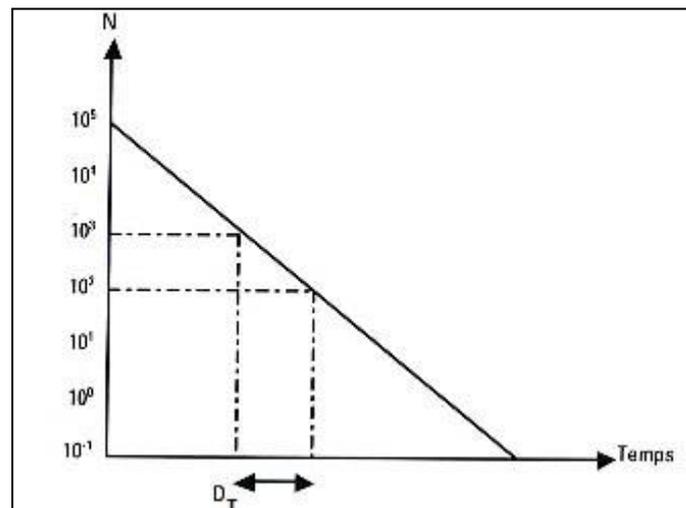


Figure I.3: Courbe de survie précisant le temps de réduction décimale (D_T)

D_T nous renseigne sur la thermorésistance des microorganismes qui dépend de plusieurs paramètres :

- de l'espèce du micro—organisme considéré,
- de son état physiologique,
- de la température
- du milieu dans lequel il est présent.

Le tableau qui suit donne des exemples de valeurs de D à 121,1°C pour quelques espèces bactériennes.

Tableau I.2 : Valeurs de temps de réduction décimales pour quelques espèces bactériennes

Bactérie et ou spore	D _{121,1°C} (en minutes)
<i>Clostridium botulinum</i>	0,21 min
<i>Clostridium sporogenes</i>	1 min
<i>Bacillus stearothermophilus</i>	3 min

Dans le cas des exemples cités c'est *Bacillus stearothermophilus* qui est la bactérie la plus thermorésistante

Si on considère le cycle log 10⁻¹, 10⁻² :

$$\text{Log } 10^{-2}/10^{-1} = -(K/2,303).t$$

$$-1 = -(K/2,303).t \text{ or } D = t.$$

$$\text{Donc : } 1 = K.D/2,303 \text{ d'où : } D = 2,303/K$$

« **D** » mesure la résistance de l'organisme à la destruction. La relation entre le temps de réduction décimale et le temps léthal pour un traitement thermique à une température fixe, permet de calculer le temps de traitement thermique :

$$\text{Log } N/N_0 = -(K/2,303) . t \quad \text{or : } D = 2,303/K$$

$$\text{Il en ressort : } t = \mathbf{D. \log N_0/N}$$

Cette équation nous permet de déterminer le temps exact du traitement thermique.

L'équation de la courbe de survie peut donc finalement s'écrire :

$$N = N_0 . 10^{-t/D}$$

❖ Facteurs influençant la courbe de survie

L'établissement de la courbe de survie précédente ne prend en considération que le temps de traitement thermique, et suppose que dans le produit alimentaire il n'y a qu'un seul type de germe et sous la forme végétative, mais dans la réalité, les contaminants sont de différente nature et sous la forme végétative et sporulée. Par ailleurs, la nature du milieu intervient pour activer ou retarder la destruction thermique :

- **Chaleur d'activation des spores :** La chaleur appliquée pendant les premières minutes servira à déclencher la germination des spores. Le maintien du traitement provoquera par la suite la mort des spores. Lorsque la quantité des spores qui germent est supérieure à la quantité des spores qui meurent, un épaulement au niveau de la courbe s'observe et précède la partie linéaire.
- **Composition des contaminants :** Dans la réalité, la flore contaminante est de nature hétérogène. De ce fait, la courbe de survie sera représentée par une succession de droites. La première partie, correspond à la destruction des germes les plus sensibles et la dernière droite aux germes les plus résistants.
- **Cellules en amas :** Le rassemblement des cellules microbiennes en amas augmentera leur résistance au traitement thermique, ce qui se traduira au niveau de la courbe par un épaulement précédent la partie linéaire.
- **Nature du milieu :** La présence de Ca^{++} dans le milieu augmente la résistance des spores, le KH_2PO_4 par contre diminue leur thermorésistance. Le pH du milieu est également un facteur important qui intervient dans la thermoresistance ou la thermosensibilité des germes.

b) Influence de la température

Auparavant, il a été considéré que la destruction des contaminants d'un produit alimentaire s'effectue à une température constante. Toutefois, pour préserver les qualités organoleptique et nutritionnelle des produits alimentaires, il est possible de moduler la température en fonction du produit considéré ; cela s'effectue en augmentant la température et en réduisant le temps de traitement ou l'inverse. Le temps de traitement (t) et la température T sont liés par une relation linéaire. La figure I.4 montre la relation existant entre le temps de chauffage et la température létale d'exposition à la chaleur. Ces couples Température de chauffage pendant une durée donnée se nomment **Barème de Traitement Thermique** ; ces barèmes sont notés (T, t). Autrement dit, plusieurs barèmes de chauffage peuvent atteindre la

même efficacité de destruction thermique ($n = E$). Une relation est établie entre la température et le temps de traitement nécessaire, la courbe est une droite appelée « Durée Thermique Mortelle ».

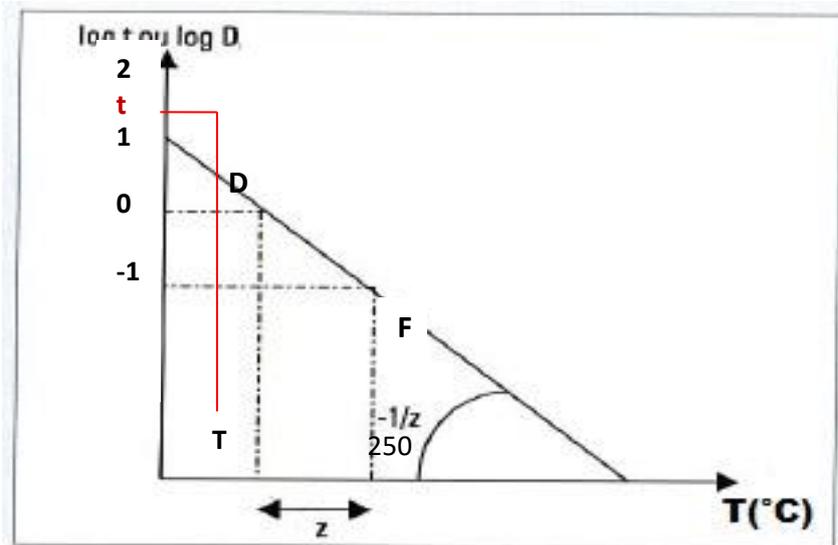


Figure I.4 : Courbe de durée thermique mortelle « Courbe TDT », pour Treatment Death Time

F : représente la durée nécessaire en minutes pour obtenir à 250°F (121,1°C) la stérilité pratique commerciale. Elle est établie au préalable pour les spores de *Clostridium botulinum*. F est également appelé « **Valeur Stérilisatrice** ».

Z : Appelé « facteur d'inactivation thermique » représente l'élévation de température qui permet de réduire 90% du temps de stérilisation. Une valeur élevée de Z indique une thermorésistante. Pour de nombreuses spores, Z est égale à 18°F.

Une relation est établie entre ces deux facteurs :

$$(\text{Log } t - \text{Log } F) / 250 - T = 1/Z$$

$$\text{Log } t/F = (250 - T)/Z$$

$$\text{Log } F/t = (T - 250)/Z$$

$$F_{T_{\text{ref}}} = t \cdot 10^{(T - T_{\text{ref}})/Z}$$

Cette équation permet de calculer, d'après une valeur stérilisatrice (VS) à une température déterminée prise comme référence prise comme base à 250°F (121,1°C) la durée d'un traitement thermique équivalent à toute autre température.

Dans la pratique de l'appertisation, on ne réalise aucun traitement dont **F** est inférieur à 4 min, les valeurs peuvent atteindre 30 min. Un chauffage au point critique de 3min à 121,1°C ou équivalent est suffisant pour assurer une réduction de 10^{12} à 10^0 spores du nombre de spores de *Clostridium botulinum* dans les produits de pH ≥ 4,5. Dans les autres cas, les **F** appliqués sont supérieurs à 3 du fait de l'existence de germes plus thermorésistants que le bacille botulique (*Bacillus thermophilus*, *Desulfomaculum nigrificans*, ...).

❖ **Taux de réduction décimale**

Un autre mode d'expression de la valeur stérilisatrice (VS):

$F_{Tref} = n.D$

« n » représente l'efficacité stérilisatrice qui est le nombre ou le taux de réduction décimales d'un traitement.

$N = \log(N_0/N)$, impliquant : $N/N_0 = 10^{-n}$

La durée du traitement thermique à la température T qui permet de détruire une proportion de microorganisme égale à n est : **$t = F = n.D$**

Comme exemple, pour les produits à pH ≥ 4,5. Il est recommandé une efficacité stérilisatrice de 12 vis-à-vis de *Clostridium botulinum*, soit une valeur stérilisatrice de 12. 0,21= 2,52 min (sachant que $D_{121,1} = 0,21$).

Il est également possible d'établir une relation entre D et Z.

$\log D_2 - \log D_1 = 1/Z (T_1 - T_2)$

D2 : Temps de réduction décimale à T2, D1 : Temps de réduction décimale à T1.

Les valeurs Z et D sont données pour quelques microorganismes dans le tableau I.3.

Tableau : Valeurs D et Z pour quelques microorganismes.

Tableau I.3: Valeurs du facteur d'inactivation thermique (Z) et du temps de réduction décimal (D) pour quelques espèces bactériennes

	T (°C)	D (min)	Z (°C)
<i>Staphylococcus aureus</i>	60	0,9	9,5
<i>Esherichia coli</i>	63	0,26- 0,47	5,3
<i>Listeria monocytogenes</i>	63	0,22- 0,58	5,5
<i>Salmonella typhimurium</i>	70,5	396 – 1050	17,5
<i>Clostridium botulinum type A</i>	121,1	0,21	10
<i>Bacillus cereus</i>	100	0,04- 27	8- 13,5
<i>Aspegillus niger</i>	61	1	3,4
<i>Streptococcus groupe D</i>	60	3- 37	10
<i>Saccharomyces divers</i>	60	0- 22	4- 6,5

1.1.2.2/ Mode de pénétration de la chaleur et calcul des barèmes temps/ Température

Pour calculer les barèmes couple temps/ Température à la stabilité du produit, il est nécessaire de connaître la variation de température au cœur du produit au cours du temps. Dans la pratique, on suit la variation de température au point le plus froid du produit appelé « point critique » ou « surface iso F » situé au centre géométrique du produit. La mesure de la variation de cette température en divers points s'effectue au moyen d'un couple thermoélectrique couplé à un potentiomètre enregistreur. Les courbes de pénétration de la chaleur sont données dans la figure ci-dessous :

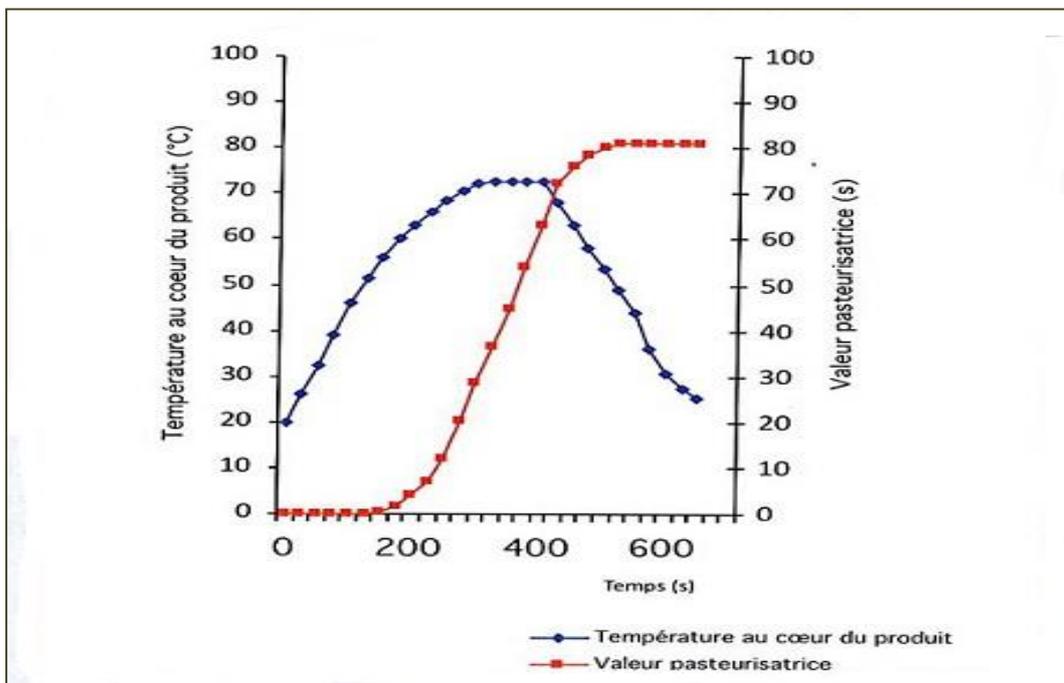


Figure I.5 : Courbe de pénétration de la chaleur dans les produits

Courbe (a) : produits liquides agités énergétiquement. Exemple d'un jus de fruit chauffé en couche mince et en circulation rapide dans un échangeur de chaleur. La température de traitement est atteinte presque instantanément (le transfert de chaleur se fait par convection). Les barèmes de stérilisation sont calculés pour une température constante du début jusqu'à la fin du traitement :

$$V.S = F_{T_{ref}} = t \cdot 10^{(T - T_{ref})/Z}$$

Courbe (b) : Produits mobiles non agités. Exemple de petits pois au naturel. Fruits en sirop. Le transfert de chaleur se fait par convection et conduction.

Courbe (c) : Produits solides (Pâtés) ou liquides à très forte viscosité (purées ou concentré de tomate). Le transfert de chaleur se fait par conduction.

Dans le cas des courbes b et c, il faut prendre en considération les phases de montée de la température t, maintien et de refroidissement. Le point critique prend une succession de températures dont chacune possède une valeur létale. L'effet stérilisateur total sera la somme des différents effets stérilisateur des traitements thermiques successifs, chacun à une température supposée constante pendant un laps de temps. En conséquence, l'effet stérilisateur sera donc :

$$V.S = F = \int_{t_1}^{t_2} 10^{(T-T_{ref})/Z} . dt$$

Les barèmes de stérilisation les plus courants sont publiés dans des recueils d'instituts professionnels. Les recueils donnent pour chaque produit, chaque format de la boîte la température de traitement et la durée de maintien de cette température. Les barèmes de stérilisation les plus fiables sont déterminés expérimentalement à l'échelle pilote en prenant en considération les conditions et les facteurs qui moduleraient ce barème ; et ce, en utilisant le produit et les contenants réels.

❖ La pasteurisation des plats cuisinés

La température retenue est de 70°C. Le microorganisme utilisé comme germe test, résistant jusqu'à 70°C est *Streptococcus faecalis*, pour laquelle on prend D= 2,95 min et Z= 10°C.

$$VP = \int_{t_1}^{t_2} 10^{(T-70)/Z} . dt$$

Il est recommandé 13 réductions décimales vis-à-vis de *Streptococcus faecalis*, d'où :

$$VP = n . D_{70} = 13 . 2,95 = 38,35 \text{ min.}$$

I.1.2/ La cuisson (contraintes organoleptiques et nutritionnelles)

La cuisson est un traitement thermique appliqué aux aliments afin de les rendre consommables. Son objectif principal est donc le développement des caractéristiques organoleptiques du produit : Amélioration du goût, de l'odeur, de la couleur et de la texture. Selon les barèmes appliqués, la cuisson peut être associée à une réduction substantielle, voir même une élimination, de la charge microbienne présente sur le produit. Les produits cuits

peuvent être conservés au réfrigérateur pendant quelques jours, et au congélateur pendant quelques semaines.

Si la chaleur détruit les microorganismes, elle altère aussi le goût, la présentation, la texture et la valeur nutritionnelle. Ces traitements, même optimisés en température et en durée, provoquent des différences importantes de cuisson entre la périphérie et le centre de certains produits, et généralement une cuisson globale inutilement excessive, notamment pour les produits à caractère conducteur. Ainsi un traitement thermique idéal de stérilisation est celui qui assure une bonne cuisson, la préservation des qualités organoleptique et nutritionnelle (protéines et vitamines) tout en garantissant la qualité sanitaire de l'aliment.

Les modifications survenant en fonction du temps et de la température sont décrites, en analogie avec la valeur stérilisatrice, par la « **Valeur Cuisatrice : VC** » dont la température de référence est de 100°C.

$$VC = \int_{T_0}^{T_f} 10^{(T(t)-100)/Z_c} \cdot Dt$$

Le paramètre Z est en relation avec l'énergie d'activation des réactions qui s'exprime en fonction de la température :

$$Ea = 2,3.R.T^2/Z$$

Les réactions de modification ont une valeur Z nettement plus élevée que celle correspondant à la destruction thermique des microorganismes (généralement égale à 10). De ce fait, l'élévation de la température accroît moins l'effet de cuisson que l'effet stérilisateur (Zc est supérieur à Z).

Des études récentes ont montré que les traitements thermiques à température variable peuvent apporter des améliorations qualitatives concernant la cuisson des aliments en utilisant la modélisation et la simulation numérique des traitements thermiques avec l'utilisation de logiciels qui autorisent une optimisation multicritères des barèmes. Le logiciel STERI'OPT® a été utilisé pour calculer et proposer des traitements thermiques à température variable. Ces cycles thermiques optimisés respectent la Valeur Pasteurisatrice ou Stérilisatrice, avec une réduction de la Valeur Cuisatrice (Vc) appliquée aux produits, par rapport aux barèmes classiques de référence.

I.2/ Les différents traitements thermiques

Le choix du traitement à appliquer pour la conservation d'un aliment dépend des objectifs souhaités tant au niveau de la réduction biologique que des qualités nutritionnelles et organoleptiques à obtenir mais également du coût du procédé à mettre en œuvre.

I.2.1/ La thermisation

Traitement appliqué au lait (63- 65°C pendant 15 à 20 secondes) en vue de réduire sa charge en bactéries psychrophiles qui se sont multipliées pendant la conservation du lait à la ferme. Ce traitement est sans effet sur les bactéries pathogènes.

La thermisation est une forme amoindrie de pasteurisation. Son objectif principal est la réduction de la charge contaminante totale sans modifier pour autant ses caractéristiques technologiques. Ce traitement entraîne une diminution de la charge microbienne banale du lait telles les bactéries psychrophiles, les bactéries lactiques et les bactéries d'affinage qui sont responsables de la fermentation et de l'affinage dans la préparation du fromage.

I.2.2/ La pasteurisation

Depuis 1864, grâce aux travaux de Louis Appert, la pasteurisation s'est imposée dans le secteur de l'agroalimentaire comme l'une des techniques les plus utilisées pour la conservation des aliments. Moins radicale que la stérilisation, elle ne détruit qu'une partie des microorganismes contaminants mais préserve toutefois les propriétés organoleptiques (absence de goût de cuit, de décoloration, rupture d'émulsion,...) et nutritionnelle (préservation des vitamines et des protéines) du produit.

Appliqué à des températures inférieures à 100°C (entre 60 et 100°C), la pasteurisation est destinée à l'amélioration de la qualité microbiologique des aliments. L'objectif principal de la pasteurisation est de détruire la flore pathogène et toxigène non sporulée (Salmonella, Brucella, Listeria, ...) et de réduire significativement la flore totale non pathogène d'altération des aliments en préservant au maximum la qualité du produit. La pasteurisation permet une conservation des produits pour une durée limitée, à l'exception des boissons alcoolisées. Ainsi, les aliments pasteurisés présentent une date limite de consommation (DLC) de quelques jours et leur conservation doit se faire au frais à une température de + 4°C.

La pasteurisation est appliquée à certains types d'aliments et principalement dans les cas suivant :

- a) Lorsqu'un chauffage plus sévère induit une détérioration excessive de l'aliment du point de vue organoleptique (foie gras, plats cuisinés,...) ;
- b) Pour détruire uniquement certaines espèces pathogènes ou toxigènes susceptibles d'être présentes dans les aliments : bacille tuberculeux (lait), salmonelles (œufs), brucella (lait);
- c) Lorsque les caractères physico-chimiques du produit (notamment un pH bas tel dans les jus de fruits) permettent l'élimination de nombreuses espèces microbiennes et empêchent la prolifération des thermorésistantes ;
- d) Lorsqu'il est utile de détruire les germes susceptibles de concurrencer la flore du ferment (par exemple: les laits fermentés).
- e) Lorsqu'il est nécessaire de détruire certaines enzymes endogènes comme la lipoxgénase du soja (oxygénase qui catalyse l'oxygénation des acides gras polyinsaturés) ou la plasmine (présente dans le lait dont le spectre d'action est assez large).

Etant donné que l'élimination des germes n'est que partielle, La pasteurisation doit être associée à des traitements de stabilisation microbiologique tels que :

- ✓ La réfrigération (+ 4°C) ;
- ✓ L'Acidité (pH inférieur à 4,5)
- ✓ Une faible activité de l'eau (obtenue par sucrage, salage, déshydratation, ...)
- ✓ Le conditionnement sous atmosphère modifiée (élimination d'O₂ et injection de CO₂).

Les produits pasteurisés sont conditionnés dans des emballages hermétiquement clos et parfois sous vide. Ils peuvent être additionnés d'additifs (sucres, sels, acides) pour stabiliser la flore résiduelle et sont stockés à température basse.

I.5.2.1/ Technologies de pasteurisation

Différentes technologies sont utilisées pour pasteuriser un produit alimentaire.

Dans le tableau I.4 sont présentés des exemples de traitements de pasteurisation appliqués et de barèmes réalisés.

Tableau I. 4 : Exemples de modes de pasteurisation appliqués aux aliments

Exemples d'aliments	Exemples de mode de pasteurisation
Lait	Pasteurisateur à échangeur à plaques (72°C/ 15s)
Crèmes	Pasteurisateur à échangeur à plaques (82°C/ 15s)
Jus de fruits	Pasteurisateur à échangeur tubulaire (97°C/ 10s)
Purée de fruits, concentré de tomate	Pasteurisateur à échangeur à surface raclée (90-95°C)
Boisson alcoolisée	Traitement après conditionnement en tunnel de pasteurisation (65°C/ 20min)
Ovoproduits	Pasteurisateurs à échangeurs tubulaires (57- 65°C/ 2-6min).

La pasteurisation peut se faire sur le produit en vrac ou après conditionnement :

- ✓ **La pasteurisation après conditionnement (ou pasteurisation des produits conditionnés)** (douches, bains d'eau). Cette technique consiste à l'opération unitaire de pasteurisation. C'est la technique classique utilisée pour la pasteurisation de la bière, le cidre et les jus de fruits. Les bouteilles défilent sous des rampes d'eau à températures croissantes (douches Ecossaises), elles séjournent à une certaine température pendant un temps déterminé (65- 75°C/ 20 à 30 min), puis elles sont soumises à des températures progressivement décroissantes.

La pasteurisation des produits en vrac (lait, jus) : Peut se faire soit indirectement via les échangeurs de chaleur d'un pasteurisateur (échangeurs de chaleur tubulaires, à plaques, ...), soit directement par la vapeur d'eau :

- Injection de vapeur dans le produit : c'est l'upérisation
- Injection de produit dans la vapeur : c'est l'infusion.

Le système direct offre de nombreux avantages tels la rapidité, l'homogénéité du traitement, l'absence de dépôts, la possibilité de traiter des produits visqueux, et une modification moindre du produit. Toutefois, ce procédé est coûteux, il est difficile de s'assurer que la vapeur est propre et non toxique et le refroidissement doit se faire sous vide et entraîne une perte d'arômes.

Quelques procédés de pasteurisation sont donnés :

- ✓ **Remplissage à chaud et auto- pasteurisation** : consiste en une pasteurisation flash (95-97°C/10s), un refroidissement à 82- 85°C et conditionnement à cette température. Les flacons sont fermés, retournés, agités (3- 4min) et refroidis.
- ✓ **Pasteurisation éclairée suivi d'un remplissage aseptique** : Consiste en une pasteurisation flash du produit, suivie d'un refroidissement jusqu'à 5- 10°C et d'un remplissage aseptique.
- ✓ **Pasteurisation sous vide** : Le produit (jus) est désaéré en couche mince sous vide en attendant son embouteillage (le capsulage se fait également sous vide).

I.2.2.2/ Etude des différentes installations de pasteurisation

I.2.2.2.1/ Les différentes sections d'un pasteurisateur

Le pasteurisateur (figure I.6) est composé de quatre sections :

- ✓ Une section de récupération de chaleur pour le préchauffage et le pré-refroidissement, elle permet de diminuer les coûts énergétiques ;
- ✓ Une section de chauffage pour porter le produit à pasteuriser à sa température de traitement ;
- ✓ Un chambreur, tube isolé thermiquement dans lequel le produit circule à température du barème, sa taille et le débit du produit déterminent la durée de la pasteurisation ou le chambrage (ce temps correspond au rapport entre le volume du chambreur et le débit volumique du produit);
- ✓ Une section de refroidissement pour porter le produit à la température de stockage.



Figure I.6: Installation d'un pasteurisateur

Les sections de récupération, de chauffage et de refroidissement sont constituées d'échangeurs dont le principe de fonctionnement repose sur un transfert de chaleur à travers la paroi :

- Soit un fluide thermique (eau chaude ou vapeur d'eau) transfère de la chaleur à un produit froid et le réchauffe;
- Soit un fluide de refroidissement (eau froide) récupère la chaleur d'un produit et le refroidit.

Il existe des échangeurs à co-courant (circulation du fluide et du produit dans le même sens) et des échangeurs à contre courant (circulation du fluide et du produit en sens inverse). Un exemple d'échangeur de chaleur à contre-courant est représenté dans la figure suivante :

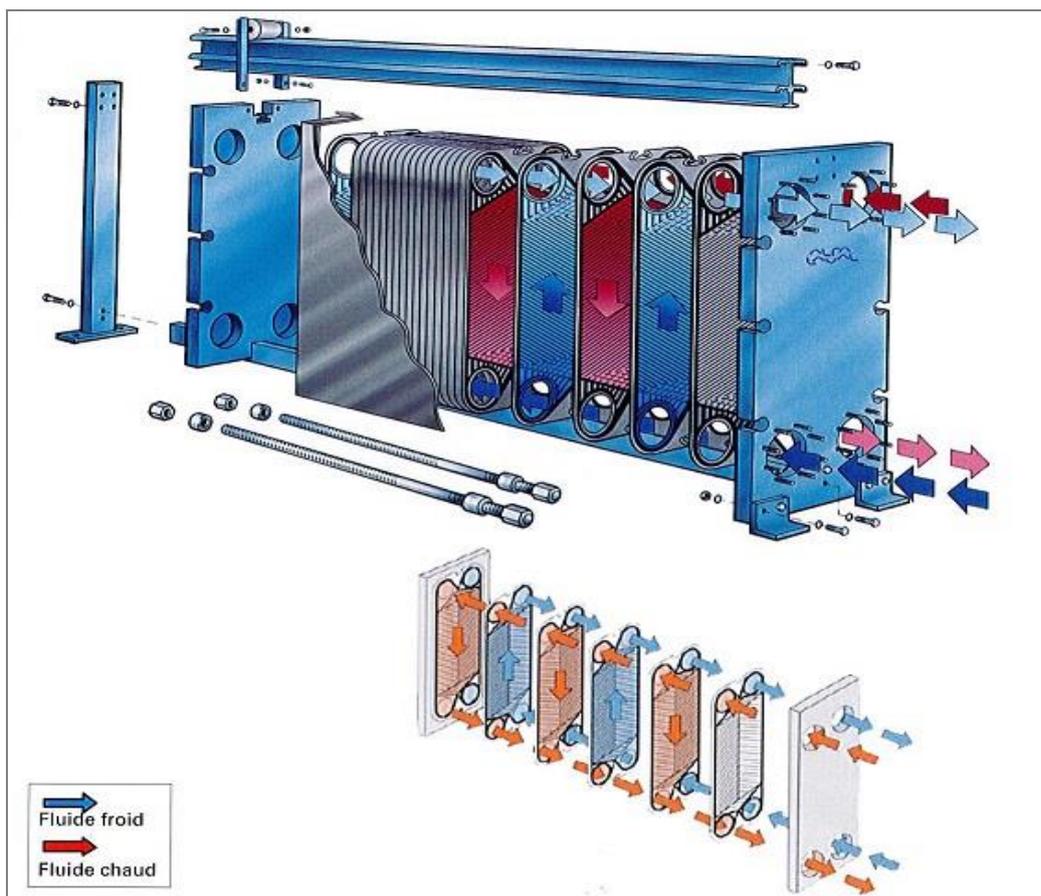


Figure I.7: Principe de circulation d'eau et de produit dans un pasteurisateur à plaque (exemple à contre courant)

I.2.2.2.2/ Les catégories d'échangeurs

Plusieurs catégories d'échangeurs sont distinguées :

- a) **Les échangeurs à plaques** : Ce type d'échangeurs (Figure I.8) est le plus utilisé en industries agroalimentaires (la surface d'échange peut atteindre 600m^2). Les liquides

circulent entre des plaques en acier inoxydable cannelées d'une épaisseur de 0,5 à 1 mm chacune, son gaufrage permet d'augmenter la surface d'échange et d'homogénéiser les liquides. Chaque paire de plaques adjacentes est espacée de 3 mm pour les produits non visqueux et de 7 mm pour les produits visqueux.

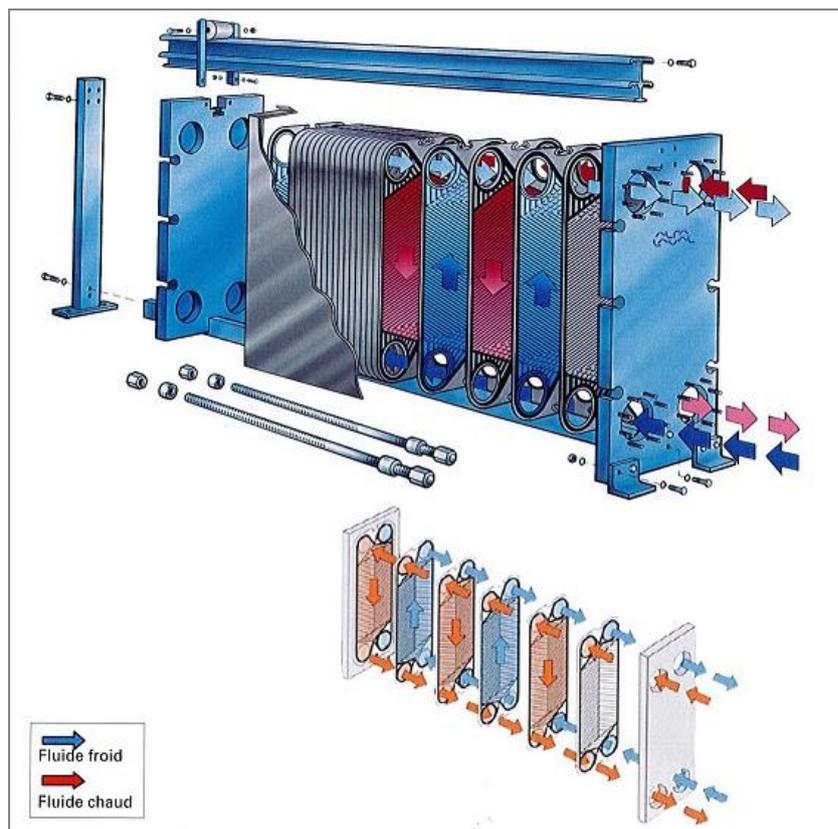
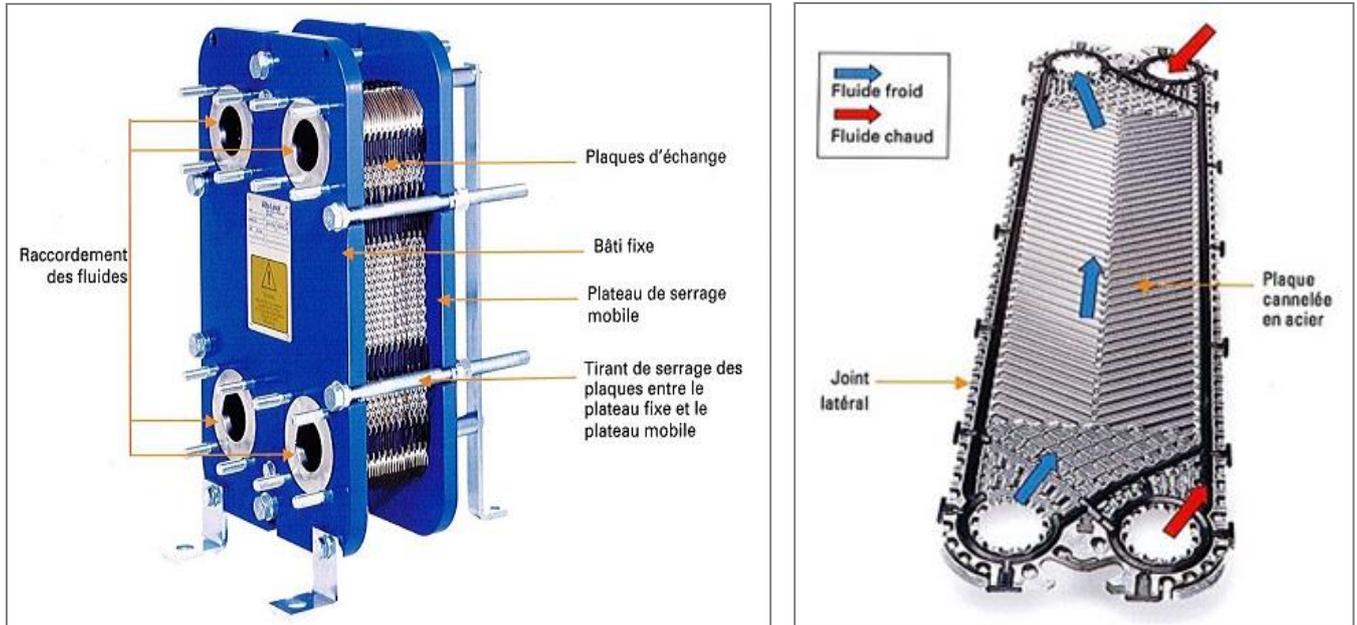


Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques

b) Les échangeurs à spirale :

Ils sont formés de deux canaux en acier inoxydable enroulés en spirale (figure I.9) dans lesquels les liquides circulent à contre courant.

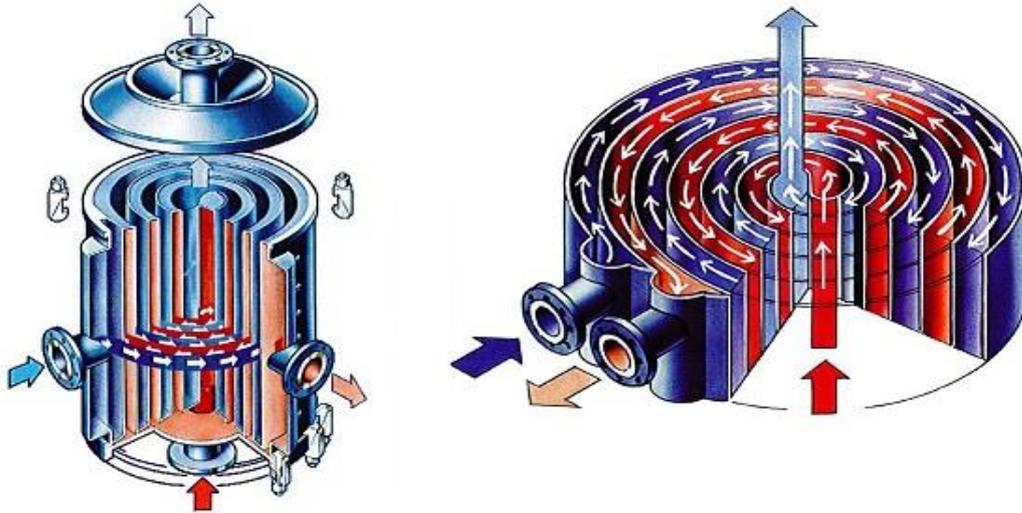


Figure I.9: Représentation schématique d'un échangeur en spirale

C) Les échangeurs tubulaires :

Les liquides circulent dans des tubes en acier inoxydable. Différents types d'échangeurs tubulaires sont distingués (Figure I.10):

- ✓ **Les échangeurs monotube et multitube :** Le produit circule dans un ou plusieurs tuyaux au centre et les fluides thermiques circulent dans la partie extérieure ;
- ✓ **Les échangeurs annulaires :** Le fluide thermique circule dans deux tuyaux (un central et l'autre annulaire externe), le produit alimentaire est propulsé dans un canal annulaire intermédiaire.

Trois principes de fonctionnement des échangeurs tubulaires sont distingués (figure 12): Un chauffage en couche épaisse (A), un chauffage en couche mince sur une seule face (B), et un chauffage en couche mince sur deux faces (C).

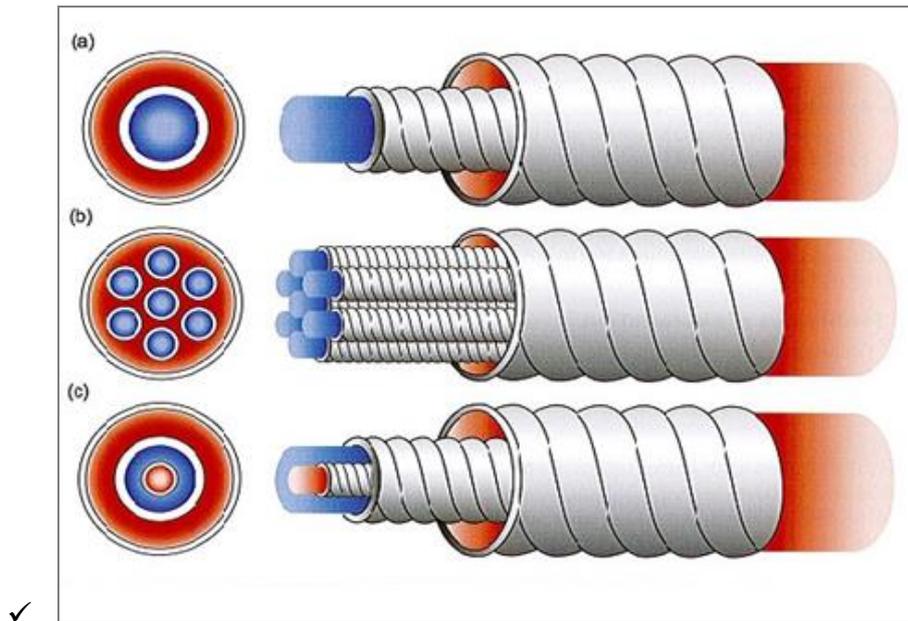


Figure I.10: Circulation des fluides dans les différents types d'échangeurs tubulaires monotube (a) multitube (b) et annulaire (c).

d) Les échangeurs à surface raclée : Utilisé pour les produits visqueux ou pâteux. Le canal central (figure I.11) est muni d'un rotor équipé de lames qui raclent le produit pour éviter qu'il ne s'y dépose.

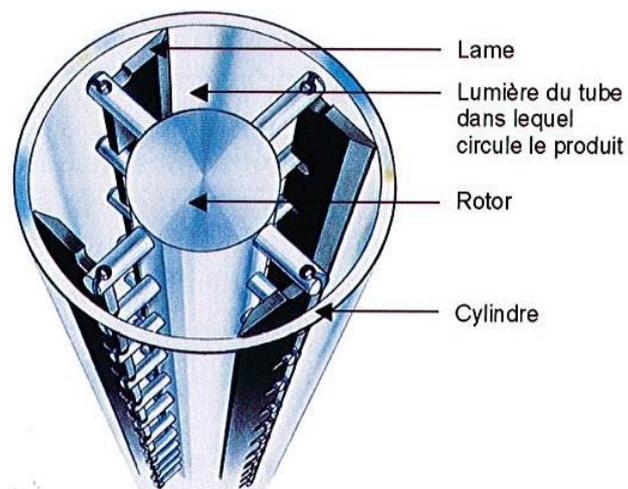


Figure I.13: échangeur à surface raclée.

e) **Les échangeurs à passage de courant :** Il s'agit d'une variante de l'échangeur tubulaire où les parois du tube sont chauffées par effet joule (en étant parcouru par un fort courant électrique sous basse tension produisant de la chaleur).

- **Avantages et inconvénients**

Chaque catégorie d'échangeurs présente des inconvénients et des avantages, résumés dans le tableau suivant :

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des différents échangeurs

	Avantages	Inconvénients
Echangeurs à plaques	Encombrement faible Nettoyage facile.	Traitement impossible des fluides visqueux
Echangeurs à spirale	Encombrement faible Résistant à l'encrassement (vitesse d'écoulement très élevée).	Faible échange de chaleur
Echangeurs tubulaires	Traitement possible des produits visqueux.	Encombrement important
Echangeurs à surface raclée	Traitement des produits visqueux et pâteux.	Coût de revient élevé.

I.2.3/ Stérilisation / Appertisation

La découverte de l'appertisation remonte à 1790 ; Nicolas Appert était le premier à avoir mis au point cette méthode de stérilisation par la chaleur dans un récipient hermétiquement clos.

La stérilisation est un procédé tendant à l'élimination totale de toute vie microbienne et des virus. L'appertisation est un procédé alliant un traitement thermique qui vise à détruire les microorganismes jusqu'au seuil de stérilité commerciale et un conditionnement étanche aux gaz, liquides et microorganismes.

Le décret du 10 février 1995 définit les produits appertisés comme étant une catégorie de conserves « denrées alimentaires d'origine végétale ou animale, périssables dont la conservation est assurée par l'emploi des deux techniques suivantes :

- Conditionnement dans un récipient étanche aux liquides, aux gaz et aux microorganismes à toute température inférieure à 55°C ;

- Traitement par la chaleur ou par tout autre mode autorisé. Ce traitement doit avoir pour but de détruire ou d'inhiber totalement d'une part les enzymes, d'autre part les microorganismes et leurs toxines, dont la présence ou la prolifération pourraient altérer la denrée considérée ou la rendre impropre à la consommation.

Plusieurs types d'aliments sont conservés par appertisation, tels : les fruits et légumes, les produits de mer, les viandes, les soupes, les sauces

Les traitements les plus utilisés pour les conserves sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau I.6: Traitements utilisés pour la stérilisation des aliments

Méthode	Séquence	Application
Auto-stérilisation	Stérilisation en vrac (85 à 100°C) Remplissage à chaud > 85°C Sertissage, thermo- scellage Refroidissement.	Tous les produits à pH de 4,5
Procédé aseptique UHT	Stérilisation en vrac (<150°C) Refroidissement Remplissage de récipients stériles Fermeture en ambiance aseptique.	Produits liquides ou pâteux
Appertisation traditionnelle	Remplissage de préférence à chaud Fermeture Stérilisation 115- 135°C Refroidissement.	tout les produits surtout les solides

Les traitements de stérilisation dans les procédés 1 et 2, appliqués avant remplissage sont généralement continus et comportent une agitation mécanique, ils sont effectués en échangeurs de chaleur tubulaires, à plaque, à surface raclée, à injection direct de la vapeur avec mise sous vide ou sous pression.

La méthode 2 de remplissage aseptique est plus complexe, le produit pré stérilisé doit être conditionné en emballage stérilisé dans une ambiance aseptique.

La méthode 3 traditionnelle et d'application générale fait appel à des appareils (autoclaves) soit très simples, statiques ou à conduite manuelle, soit très sophistiqués continus ou discontinus.

I.2.3.1/ Principe de fonctionnement d'un autoclave

La stérilisation des produits à l'aide d'un autoclave se déroule en quatre étapes (figure I.15):

- a) **La purger** : consiste à purger l'air de l'autoclave qui pourrait entraver le transfert de chaleur et déformer les boîtes de conserves.
- b) **La montée en température** : elle doit être rapide pour éviter la cuisson du produit, il est préférable d'introduire des produits préchauffés.
- c) **Le pallier de stérilisation** : c'est le maintien d'une température définie pendant un temps défini. L'objectif est la destruction des formes microbiennes végétatives et sporulées. Il est nécessaire que la pression interne de l'autoclave soit supérieure à la pression de vapeur saturante afin d'assurer l'étanchéité des bords dans la mesure où elle plaque la capsule sur le bocal.
- d) **Le refroidissement ou détente de pression** : L'objectif est de refroidir rapidement le produit pour éviter sa cuisson. La température de l'autoclave diminue plus rapidement que celle du cœur du produit (point froid).

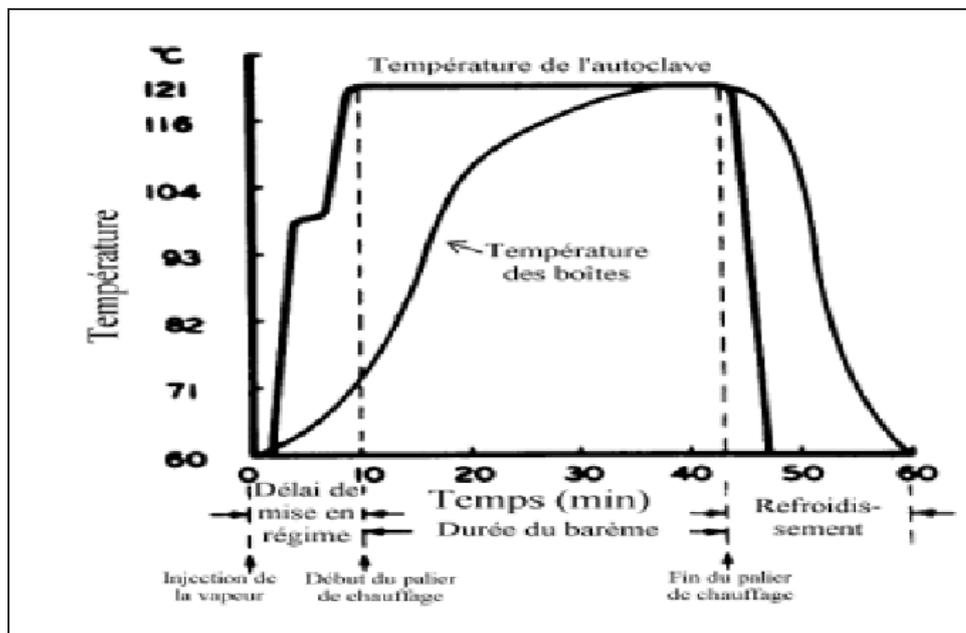


Figure I.12: Evolution de la température dans un autoclave

I.2.3.2/ Influence de la Stérilisation sur la qualité du produit alimentaire

a) Influence sur les glucides

La stérilisation est à l'origine de plusieurs modifications sur les glucides qui concernent l'amidon, le saccharose, les sucres réducteurs et les fibres :

- Formation d'empois d'amidon (Rôle épaississant) et en milieu acide hydrolyse partielle de l'amidon en améliore la digestibilité ;

- Inversion du saccharose en milieu acide (caramélisation) qui conduit à une modification de l'arome, du goût et de la couleur.
- Réaction de Maillard (source de déperdition des acides aminés et des sucres réducteurs).
- Dissolution et dégradation des substances pectiques à l'origine d'un ramollissement des fibres cellulosiques.

b) Influence sur les lipides :

Les modifications sont très minimales si la stérilisation se fait à l'abri de l'air. Le vernissage intérieur des boîtes empêche l'oxydation des lipides sous l'influence du contact avec les catalyseurs.

c) Influence sur les protéines

Les principales modifications sont :

- La dénaturation des protéines et perte des propriétés biologiques (activité enzymatique). Mais parfois cette modification est souhaitée (coagulation des protéines myofibrillaires et meilleure digestibilité, dénaturation des facteurs antinutritionnels du soja).
- Apparition de composés sulfurés libres : goût de cuit.
- Modification chimique des résidus d'acides aminés : Libération d'H₂S à partir de la cystéine (modification d'arome)
- Diminution de la disponibilité en lysine (perte de la valeur nutritionnelle)
- Apparition de composés mutagènes lors du grillage.

d) Influence sur les vitamines et les minéraux

- Déperditions par dissolution.
- Modification des équilibres minéraux solubles et insolubles : insolubilisation du calcium du lait, influence sur la stabilité des micelles...
- Diminution de la valeur nutritive par destruction des vitamines surtout C, B1 et B12, les vitamines liposolubles (A,D,E,K) sont peu affectées.
- Accélération de l'oxydation des vitamines si le chauffage est réalisé à l'air libre.

Conclusion :

Les traitements thermiques permettent de stabiliser les denrées, mais doivent être maîtrisés pour éviter des dégradations importantes des produits. Les traitements « Flash »

permettent une meilleure protection des nutriments par comparaison à l'appertisation traditionnelle.

Il faut ainsi établir un compromis entre l'objectif recherché (destruction des microorganismes, et ses conséquences non souhaitées (perte de la qualité nutritionnelles, effet de cuisson, d'où la nécessité d'optimiser les barèmes de stérilisation ou de pasteurisation.

I.3/ Technologie des traitements thermiques en vrac

C'est incontestablement l'intérêt suscité par les traitements H.T.S.T. (High Temperature Short Time) qui a entraîné le développement progressif des traitements thermiques en vrac des produits liquides, puis des produits pâteux.

La maîtrise d'un procédé H.T.S.T. nécessite une montée rapide de température, de même qu'un refroidissement rapide des produits qui n'est possible qu'à condition de se libérer de la géométrie d'un contenant pour épouser celle d'un échangeur de chaleur (présentés plus haut). C'est ainsi, qu'une boisson flash pasteurisée ne séjournera qu'une trentaine de secondes dans un échangeur à plaque au lieu d'une quarantaine de minutes dans un tunnel de pasteurisation. En dehors de la rapidité et de l'homogénéité du chauffage, le traitement thermique en vrac offre l'avantage de supprimer toute contrainte liée au récipient ou à l'emballage. En revanche, la mise en œuvre d'un traitement thermique en vrac s'avère plus délicate du fait que les emballages doivent être stérilisés séparément, remplis aseptiquement ce qui impose un des appareils sophistiqués et un personnel plus qualifié.

I.6.1/ Mise en œuvre d'un traitement thermique en vrac

I.6.1.1/ Cas des produits liquides à visqueux

Le traitement peut se faire :

- **Indirectement** : via les différents échangeurs étudiés en début du chapitre (échangeurs tubulaires, à plaque, à surface raclée...);
- **Directement** : soit directement avec la vapeur ; qu'il s'agisse d'une upérisation (vapeur dans le produit) ou d'une infusion (produit dans la vapeur).

La durée de stérilisation est plus courte dans ce cas que dans un chauffage en couche mince, n parle alors de stérilisation haute température.

- ❖ **Exemple** : le lait UHT (stérilisation par pulvérisation : produit dans la vapeur) (figure I.13). Dans ce procédé, le lait est pulvérisé dans une chambre à vapeur, refroidi et conditionné aseptiquement, l'emballage doit être stérilisé à part, par utilisation d' H_2O_2 .

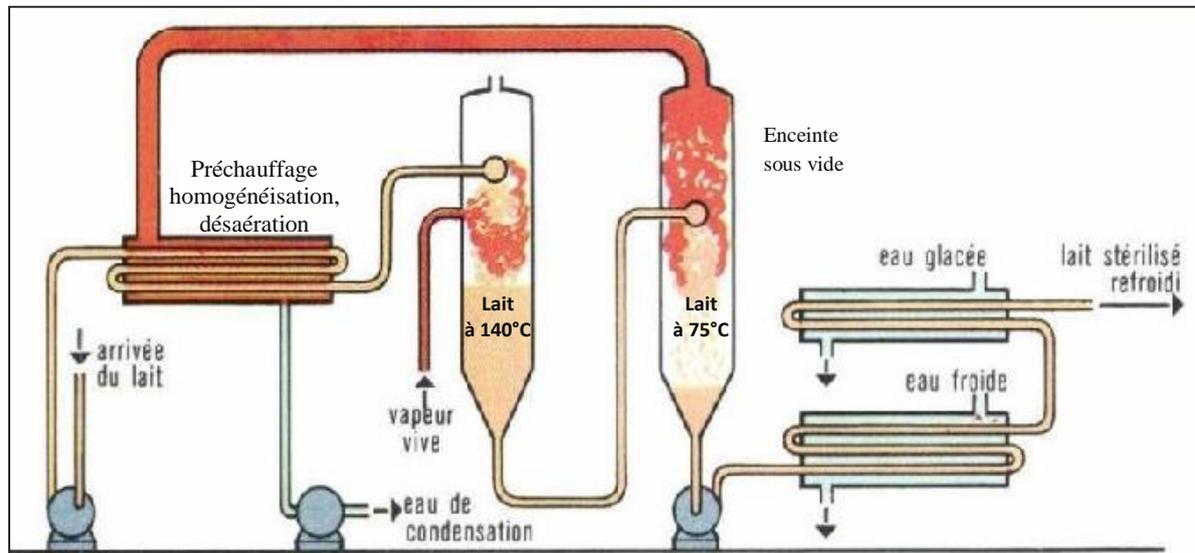


Figure I.13: Principe de fonctionnement de la stérilisation du lait par UHT

Le système direct offre plusieurs avantages :

- Chauffage et refroidissement rapides ;
- Possibilité de traitement des produits visqueux ;
- Faible modification du produit.

Néanmoins, son application se heurte à certains inconvénients :

- Difficulté d'avoir une vapeur propre et non toxique ;
- Le refroidissement s'effectue sous vide, ce qui peut entraîner une perte d'arômes ;
- Coût énergétique élevé ;
- Appareils plus coûteux.

I.6.1.2/ Cas des produits solides immergés dans une phase liquide

Le traitement en vrac des aliments contenant des composés solides dans une phase liquide (viandes cuisinées, légumes ou fruits), gagnent à traiter séparément les deux phases : la phase liquide est traitée en continu dans un échangeur alors que la phase solide est traitée dans un autoclave spécial.

Introduction

Le froid est utilisé comme moyen de conservation des denrées périssables (lait, produits laitiers, viandes, poissons, légumes, plats cuisinés...). Au 18^{ème} siècle, l'ingénieur Le Tellier crée les premières machines technologiques du froid. Actuellement, la réfrigération est considérée comme un moyen quasi- obligatoire, de stockage des aliments jusqu'à la consommation, aussi bien au niveau familial qu'industriel. Les températures appliquées sont basses, lorsqu'elles sont supérieures à 0°C on parle de froid positif (c'est la réfrigération) ; lorsqu'elles sont inférieures on parle de froid négatif (c'est la congélation).

L'application du froid est la technique de conservation la plus répandue, les basses températures retardent le développement des microorganismes, les réactions chimiques et enzymatiques qui altèrent le produit. Le froid conserve, quand il en est fait une application correcte, les caractères naturels des produits. L'utilisation du froid a eu des conséquences sur le plan individuel (apparition des surgelés) et économique (limite les pertes).

Chaque microorganisme a une température optimale, maximale et minimale de croissance, la température minimale correspond à la température la plus basse permettant de maintenir la croissance, au dessous de cette température le germe n'est plus capable de croître et ses activités métaboliques ralentissent. Lorsque la température est suffisamment basse, il est possible d'inhiber la croissance microbienne.

Etant donné que le froid n'est pas un traitement stérilisant comme la chaleur, il est donc impératif que l'aliment destiné à être conservé soit de bonne qualité microbiologique et qu'il ait atteint un stade de maturité qui en permette la consommation.

Les trois principes fondamentaux (trépied frigorifique de Monvoisier) sont à la base de toute utilisation du froid :

- 1/ Qualité du produit (le produit doit être sain)
- 2/ Précocité du froid (le produit doit être soumis rapidement au froid)
- 3/ Le froid doit être continu (de la production jusqu'à la consommation). Cette nécessité suppose une chaîne de froid (entrepôts frigorifiques, camions frigorifiques, chambres froides et réfrigérateur ménager).

II.1/ La réfrigération (Froid positif)

La réfrigération implique une conservation à des températures supérieures au point de congélation (0°C). Elle comprend deux étapes :

- a) **Le refroidissement** : Abaissement de la température à la valeur souhaitée, il doit être rapide surtout s'il succède à une cuisson.
- b) **La conservation à la température de réfrigération** : Elle est limitée dans le temps, d'où la nécessité d'une DLC (Date Limite de Consommation). En effet, dans les produits réfrigérés, l'eau demeure liquide. L'action des enzymes n'est que ralentie et la croissance des psychrophiles peut s'effectuer, en conséquence, la durée de stockage est courte (quelques jours).

II.1.1/ Action du froid positif

Le froid ne détruit pas les toxines ni les microorganismes contenus dans les aliments, il peut stopper leur développement.

- Quelques exemples sur l'effet du froid sur la croissance microbienne :

A 10- 12°C : Arrêt de la Toxinogène de *Staphylococcus aureus* et *Clostridium botulinum* types A et B

6,7°C : Arrêt de la multiplication de *Staphylococcus aureus*.

6,5°C : Arrêt de la multiplication de *Clostridium perfringens*.

5°C : Arrêt de la multiplication de *Salmonella*.

3,3°C : Arrêt de la Toxinogène de *Clostridium botulinum* type E.

II.1.2/ Evolution de la microflore au cours de la réfrigération

Aux températures de réfrigération, les microorganismes capables de se développer sont les psychrophiles (flore d'altération superficielle), ils sont ralentis entre 0 et 4°C. Les principaux genres de putrefaction sont : *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Enterobacter*, *Micrococcus*, *Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Flavobacterium*, *Listeria*.

L'activité de ces germes est augmentée, d'une part par l'augmentation de la température :

Avec une augmentation de 5°C, la croissance est multipliée par 2, une augmentation de 10°C multiplie par 4 leur croissance.

D'autre part, cette croissance est régit par l'activité de l'eau des couches superficielles du produit ; ces germes exigent une activité de l'eau de 0,96 ou une humidité relative de 96%. En conséquence, la dessiccation superficielle du produit (viande) qui s'installe au cours de la réfrigération limite la croissance de ces contaminants.

A basse température et air sec, seules quelques espèces de moisissures (*Aspergillus*, *penicillium*, *Cladosporium*) se développent.

En conclusion, pour une bonne conservation par réfrigération, il importe d'abaisser suffisamment la température de réfrigération et de réduire l'activité de l'eau.

La figure II.1 donne l'évolution de la flore du lait réfrigéré. La croissance de ces bactéries peut contribuer à l'apparition des défauts qui peuvent être importants : Après 48h à 4°C, la flore psychrophile est dominante, ces microorganismes produisent des enzymes lipolytiques et protéolytiques résistants à la chaleur, ces enzymes sont responsables de la solubilisation de la caséine et ont une action sur la matière grasse du lait.

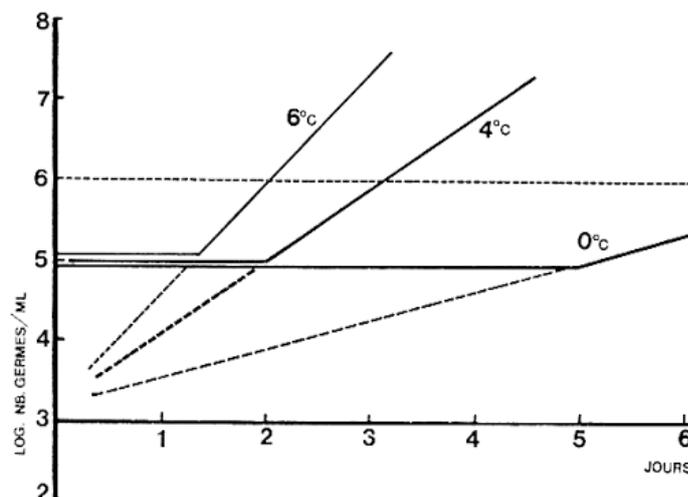


Figure II.1 : Courbe représentant l'évolution de la flore du lait au cours de la réfrigération

II.1.3/ Les paramètres influençant l'activité bactérienne au cours de la réfrigération

II.1.3.1/ La température : La durée de stockage est d'autant plus longue que la température de réfrigération est proche de la température minimale de croissance. :

Exemple : Les contaminants de la viande bovine augmentent de 10 fois lorsque la température passe de 4 à 9°C et de 100 fois de 9 à 15°C

La température de réfrigération permet également une sélection des germes contaminants.

Exemple : à 1°C, la flore dominante du poulet est *Pseudomonas*, à 15°C c'est les *Enterobactéries* et les *Acenitobacter*.

II.1.3.2/ La vitesse de réfrigération

Afin d'éviter l'altération des produits à partir des parties profondes (par les contaminants de profondeurs responsables de la putréfaction), il est important que le cœur du produit atteigne la température de réfrigération le plus rapidement possible sans pour autant provoquer le cryo-choc des couches superficielles (figure II.2).

Le temps de demi-refroidissement ($tp_{S_{1/2ref}}$) : temps nécessaire pour réduire de moitié la différence de température entre le cœur du produit et celle du milieu de refroidissement.

Exple : $tp_{S_{1/2ref}} = 20$ min : réfrigération lente.

$tp_{S_{1/2ref}} = 8$ min réfrigération rapide.

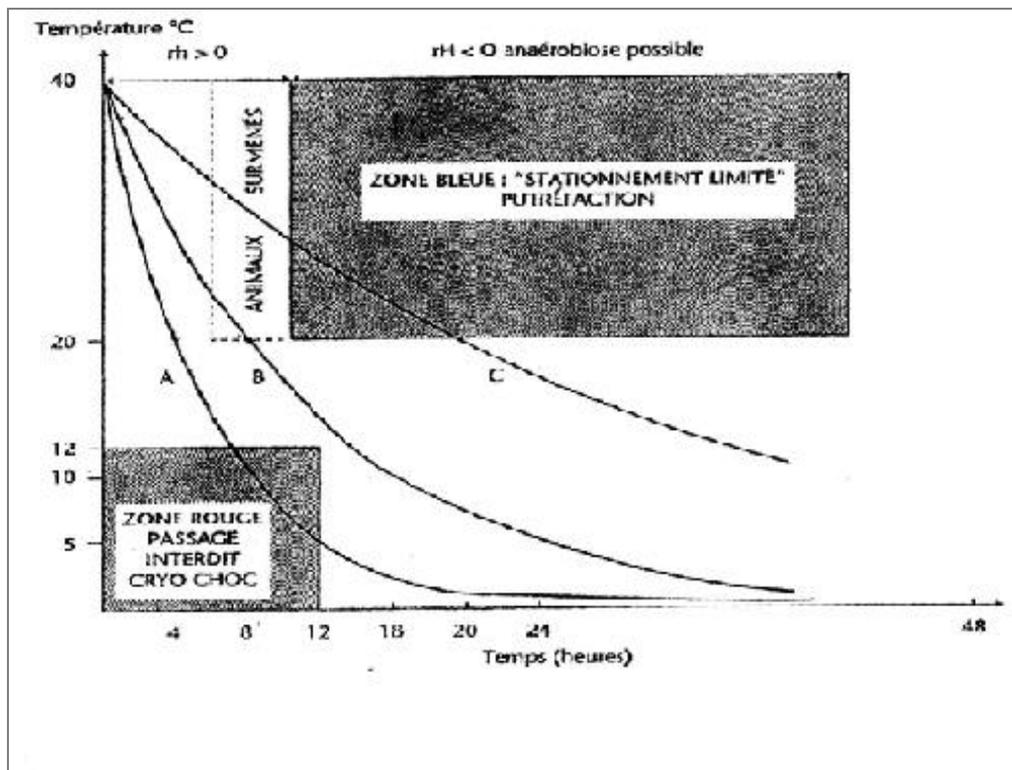


Figure II. 2 : Courbes théoriques de réfrigération de la viande bovine

II.1.4/ Caractéristiques des produits réfrigérés

a) La cellule végétale : reste en vie après la récolte, pendant un temps plus au moins long suivant l'espèce, donc respirent et subissent des modifications touchant leur qualité organoleptiques et nutritionnelles. Le froid diminue le métabolisme et inhibe ou ralentit le développement de la flore microbienne. La réfrigération est un moyen de conservation limité. Le temps d'application doit être adapté au végétal.

b) La cellule animale : Telles que celles des viandes et des produits de pêche, peuvent être considérées comme mortes peu de temps après l'abattage et elles subissent rapidement l'action d'enzymes catabolisantes. Le froid diminue et retarde cette action, avec un certain ralentissement, il permet les phénomènes biochimiques conduisant à la rigidité cadavérique puis à la maturation qui développe un pH de 5,7 à 5,9 et les qualités organoleptiques de la viande. Il bloque la putréfaction profonde liée aux germes anaérobies, mais les germes psychotrophes se développent au bout de quelques jours et sont à l'origine d'un enduit muqueux à la surface de la viande, puis de sa putréfaction superficielle. Le froid limite la flore psychrophile des poissons. De pH 6,5 à 6,7 et de texture fragile, ceux-ci subissent rapidement la dégradation microbienne malgré la réfrigération dans la glace broyée, appliquée du navire de pêche à la vente au détail. La glace utilisée doit répondre aux normes de potabilité et aux critères de pureté réglementaire.

II.1.5/ Systèmes et techniques de refroidissement**II.1.5.1/ Les systèmes de refroidissement****a) Détente direct et refroidissement indirect**

Les systèmes de refroidissement à compression de vapeur sont les plus répandus (figure II.3):

- ✓ Dans la détente directe : l'évaporateur est placé directement au contact du milieu à refroidir.
- ✓ Dans le système indirect de refroidissement : le refroidissement se fait par un fluide médiateur, refroidi par un fluide frigorigène : CFC (ChloroFluoroCarbones), HCFC (HydroChloroFluoroCarbones) et les HFC (HydroFluoroCarbones). Ces fluides exercent un effet néfaste sur la couche d'ozone.

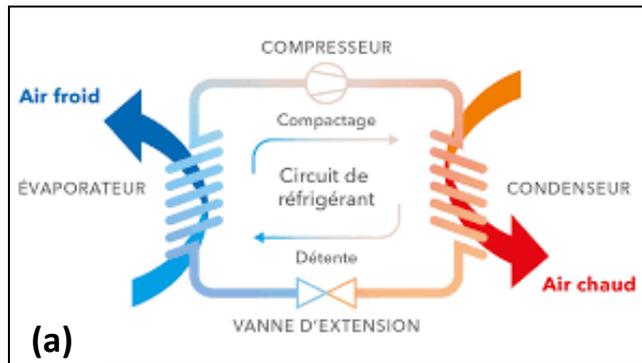


Figure II.3 : Schéma d'une installation de refroidissement à détente directe (a) et d'un système indirect de refroidissement (b)

Les principales techniques utilisées pour la conservation des aliments par refroidissement sont:

- a) La réfrigération lente : le refroidissement se fait à l'air ambiant et à température voisine de 15°C.
- b) La réfrigération rapide : Dans une chambre de refroidissement avec circulation forcée d'air à des températures de 0 à 5°C. Cette technique évite le développement microbien au cœur du produit, toutefois, son application peut être à l'origine de cryo-choc.
- c) La stimulation électrique : la carcasse de la viande est excitée par un courant électrique, les contractions provoquées consomment rapidement le glycogène, d'où la diminution du pH. La rigidité cadavérique s'opère sur un muscle relâché.
- d) Refroidissement par air forcé : ventilation importante d'air froid.
- e) Brumisation : il s'agit de pulvériser de fines gouttelettes d'eau stériles sur la surface du produit, ce qui accélère la réfrigération et évite la perte en poids.
- f) Refroidissement par le vide : évaporation de l'eau sous pression atmosphérique.
- g) Refroidissement par eau glacée : pulvérisation d'eau glacée ou immersion dans une eau glacée.

❖ Les fluides frigorigènes

Ils sont classés en deux familles :

- les hydrocarbures : butane (R600), isobutane (R600a) et cyclopropane (R1270) ;
- les hydrocarbures halogénés, eux-mêmes divisés en trois types :
 - ✓ les CFC (ChloroFluoroCarbones) :

- ✓ les HCFC (HydroChloroFluoroCarbones) : 2015 en tant que destructeurs de la couche d'Ozone ;
- ✓ les HFC (HydroFluoroCarbones).
Une action néfaste sur la couche d'Ozone et sur l'effet de serre leur a été reconnue;

II.2/ La Congélation (Froid négatif)

La congélation consiste à abaisser suffisamment la température du produit de façon à transformer l'eau qu'il contient en glace et à maintenir cet état pendant toute la durée de la conservation.

La congélation doit son pouvoir de conservation à deux effets :

- ✓ Elimination de l'eau liquide transformée en glace, entravant ainsi toute activité microbiologique et ralentissant toutes les activités enzymatiques ;
- ✓ Effet thermique avec refroidissement des produits traités jusqu'à des zones de température pour lesquelles toutes les activités biologiques sont très réduites.

La qualité des produits congelés reste associée à un minimum d'eau liquide résiduelle :

Exemple : Pour la viande, la température de congélation est $-1,1^{\circ}\text{C}$ (en raison de sa teneur en sel minéraux et de ses liaisons avec les protéines musculaires, le pourcentage d'eau glacée croît en fonction de l'abaissement de la température, mais il reste toujours une proportion d'eau liquide : 26% d'eau liquide à -5°C

18% d'eau liquide à -10°C

14% d'eau liquide à -18°C

10% d'eau liquide à -40°C .

- **La surgélation :**

Lorsque la congélation est très rapide et est suivie d'un stockage n'excédant pas -18°C , on parle de surgélation.

La surgélation consiste donc à congeler rapidement une denrée saine et en parfait état de fraîcheur, en abaissant sa température très rapidement jusqu'à -18°C . Grâce à ce procédé, l'eau contenue dans les cellules se cristallise finement limitant ainsi la destruction cellulaire. Les produits ainsi traités conservent leur texture, leur saveur et peuvent être conservés plus longtemps. Les produits surgelés doivent-êtré étiquetés comme tels et ne doivent pas, au cours de leur stockage ou de leur transport, subir des fluctuations de températures.

II.2.1/ Action du processus de congélation sur les microorganismes

La congélation agit de différentes manières sur la flore microbienne :

- a) L'abaissement de la température réduit la vitesse de multiplication des germes
- b) La transformation de l'eau en glace diminue la quantité d'eau disponible pour les microorganismes, la congélation inhibe leur multiplication
- c) Le changement d'état eau liquide/glace provoque des altérations des structures ou du métabolisme des germes, susceptible d'entraîner la mort de certains d'entre-eux.

❖ Influence de la température de congélation

Durant la congélation à -10°C : Arrêt de toute multiplication bactérienne, y compris les psychrophiles et les psychrotrophes

A -12°C : arrêt de la multiplication des moisissures

A -18°C : arrêt de la multiplication des levures

Il importe de souligner que même la congélation à -18°C n'a pas d'effet bactéricide, elle réduit la population microbienne mais dans une faible proportion. A cet effet, certains germes sont plus sensibles que d'autres :

- Les germes très sensibles : Levures et moisissures en phase de bourgeonnement et Bactéries à Gram négatif (surtout les entérobactéries)
- Les germes moyennement sensibles : Les bactéries à Gram positif : *Enterococcus*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Lactobacillus*.
- Les germes résistants : Les cellules végétatives des levures et moisissures et les spores bactériennes.

Si certains microorganismes résistent au froid, les parasites, par contre, sont assainis par la congélation (les larves des *Tenia* et des *Trichines* meurent après 5 semaines à -18°C).

On voit, par conséquent l'importance qu'il y a à ce que les températures d'entreposage à l'état congelé, de congélation et de conservation temporaire après décongélation soient rigoureusement contrôlées afin d'éviter la prolifération de microorganismes dangereux.

II.2.2/ Les étapes de la congélation

La congélation est divisée en trois étapes :

- a) Précongélation : Refroidissement du produit à la température de congélation « Température de cristallisation commençante ».
- b) Phase de congélation : (cristallisation) correspond à la phase de changement d'état de l'eau en glace et croissance des cristaux par nucléation de la glace.
- c) Refroidissement : C'est la conservation à la température de congélation.

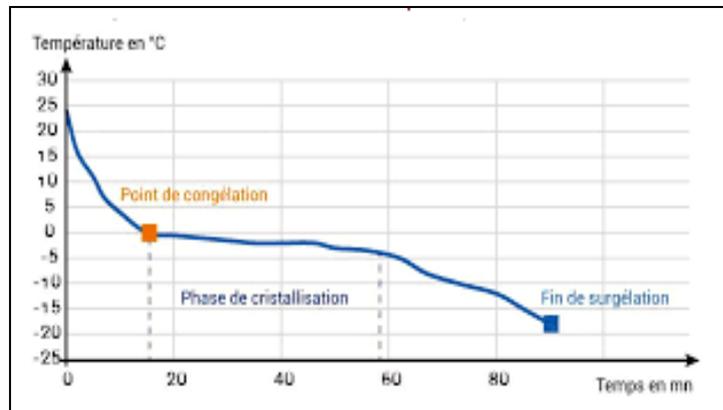


Figure II.4 : Les phases de congélation

II.2.3/ Influence de la vitesse de congélation

Suivant la vitesse de congélation, on distingue la :

- a) **Congélation lente** : Effet plus néfaste sur la survie des microorganismes car les cellules sont exposées pendant un temps plus long à la cryoconcentration d'une part. Au fur et à mesure que l'eau gèle, la concentration des liquides extracellulaires s'élève, l'eau va sortir des cellules qui peu à peu se plasmolysent et se dessèchent. D'autre part, les cristaux de glace sont plus gros et le risque d'altération de la membrane est plus élevé.
- b) **Congélation rapide** : se caractérise par une cristallisation extra et intracellulaire avec formation de petits cristaux par phénomène de surfusion de la cellule. Pour les levures c'est la congélation rapide qui est la plus intéressante

La destruction des germes par le froid est aussi régit par les constituants du produit alimentaire (le sel, le glucose et le glycérol sont des cryoprotecteurs)

La congélation ultra-rapide qui donne des cellules à aspect vitrifié est réservée pour la conservation des tissus greffés.

II.2.4/ Effets de la congélation sur l'aliment

Les produits congelés ne sont pas inertes, leur qualité baisse progressivement au cours de l'entreposage en raison des modifications chimiques et physiques. La température d'entreposage est spécifique pour chaque produit en fonction de la durée de conservation prévue, la majorité des aliments sont stockés à -18°C . Le tableau I donne les durées maximales de stockage des produits alimentaires en fonction de la température d'entreposage.

II.2.4.1/ Modifications physico-chimiques

- ✓ Augmentation du volume d'eau (9%) : Cette augmentation peut créer des tensions au niveau des structures tissulaires ;
- ✓ Déshydratation des tissus : elle est marquée pour les végétaux (plasmolyse possible des cellules), engendre une déshydratation par sublimation (brulures par le froid). Ces pertes en eau se traduisent par une perte en poids et dépendent de la surface exposée par rapport au volume :

Elles sont plus importantes si les produits sont de petites dimensions et pour des surfaces irrégulières. Pour ce, il est recommandé d'emballer les produits avant congélation et que l'emballage adhère parfaitement au produit afin d'éviter tout risque de givrage.

- ✓ Augmentation de la concentration saline des solutions, qui est à l'origine de l'augmentation de la force ionique des solutions.
- ✓ Possibilité de dénaturation des protéines myofibrillaires des viandes et surtout des poissons, avec perte de rétention d'eau ;
- ✓ Modification de la structure des lipoprotéines de l'œuf.

Le tableau II.1 donne la durée maximale de conservation de quelques produits alimentaires.

Tableau II.1 : Durée maximale de stockage des produits alimentaires (en mois)

Produit	-18°C	-12°C
Jus d'orange	10	4
Fraise	12	2,5
Petits pois	10	3
Poisson maigre	3-5	<2
Poisson gras	2	<1,5
Poulet roti	3	<1
Muscle de boeuf	13	5

II.2.4.2/ Modifications biochimiques

Les enzymes ne sont pas toutes inhibées ; il y aura par conséquence hydrolyse des lipides, oxydation de certaines vitamines, dénaturation des protéines, ...Il est à noter que certains fruits (pomme, pêche,..) brunissent durant la congélation.

II.2.5/ Conséquences de l'entreposage sur les aliments congelés

- a) **Déshydratation** : Elle est fonction du temps de stockage, et conduit à la dessiccation superficielle. Elle est limitée par l'étanchéité de l'emballage.
- b) **Rancissement des lipides** :
 - **Voie biochimique** : par action des lecithinases, des phospholipases et des lipases, qui sont à l'origine de l'hydrolyse des phospholipides avec libération d'amines à gout de poissons (choline, dégradation des lipoprotéines) et libération d'acides gras libres oxydables.
 - **Voie chimique** : Oxydation autocatalytique des acides gras insaturés, avec formation de peroxydes eux-mêmes générateurs d'aldéhydes, cétones et acides. Au contact de ces peroxydes, il ya formation de protéines oxydées ce qui conduit à la diminution de la valeur nutritionnelle des protéines.
- c) **Modification des matières azotées** : par augmentation des acides aminés libres et libération d'ammoniaque qui donne une odeur aigrette pouvant disparaître à la cuisson.
- d) **Dénaturation des protéines** : agrégation des protéines musculaires des viandes et poissons et gélification des protéines du lait. Diminution de la capacité de rétention d'eau lors de la décongélation (exsudation importante).

Les aliments végétaux au cours de la congélation se caractérisent par :

- Une perte de turgescence et ramolissement (fraises en particulier) ;
- Brunissement enzymatique des végétaux (pommes, pêches), il est recommandé de blanchir les légumes avant congélation ou d'ajouter des antioxydants (acide ascorbique, SiO_2) ;
- Modification de la couleur des pigments : anthocyanes (fraises), chlorophylles, virent du vert au brun verdâtre (haricots vert, épinards), caroténoïdes (brunissement) ;

- Modification de la flaveur, due à l'affadissement de l'arôme par perte de composés volatiles et apparition de goût de foin.

N.B : - L'hydrolyse et l'oxydation des lipides limitent l'entreposage des viandes grasses et surtout des poissons, même maigres, du fait de l'instauration des lipides.

-Au cours de la congélation, il faut employer un emballage adhérent au produit, imperméable à l'eau et à l'oxygène et réaliser un conditionnement sous vide.

❖ Les maladies du froid

La durée de conservation augmente lorsqu'on abaisse la température, par exemple, pour la poire Packham's, la durée de conservation est supérieure à 8 mois à 1°C, elle n'est plus que de 4 mois lorsque la température s'élève à une température supérieure à 1°C. Cependant, il existe des fruits pour lesquels les basses températures entraînent des altérations physiologiques connues sous le nom de maladies du froid. L'impact du froid diffère suivant l'espèce ; celles d'origine tropicales ou subtropicales sont les plus sensibles ($T > 7^{\circ}\text{C}$). Pour les espèces insensibles, le passage au froid est nécessaire pour stimuler la synthèse du précurseur de l'éthylène.

Les symptômes des maladies du froid peuvent aller de simples troubles de nature qualitative en raison de la diminution de la production de l'éthylène (maturation incomplète des tomates ou anormale des pêches et nectarines, sucrage des pommes de terre) à de véritables maladies qui se manifestent par de petites dépressions de la peau (pitting) ou par des brunissements internes ou superficiels (oxydation des composés phénoliques).

II.2.6/ Les techniques de congélation industrielles

Les principaux procédés de congélation utilisés, à l'échelle industrielle, sont présentés dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Principaux procédés de congélation

Types de congélateurs	Agent de transfert de l'énergie	Principe de congélation	Denrées alimentaires traitées
1. A plaques par contact direct	Le métal est porté à température <-30°C.	Echange thermique par contact direct entre les produits et les plaques dans lesquelles le produit frigorigène circule.	Produits conditionnés en paquets parallépipédiques : plats cuisinés, filets de poissons, ...
2. A air soufflé			
Tunnel de congélation de type discontinu et congélateur à bande porteuse	Air -25°C à -45°C	Rapidité des échanges thermiques provoqués par la convection dans un courant d'air froid	Produits préemballés : petits pois, poissons, produits liquides et pâteux
Congélateurs à lit fluidisé avec tapis	Air à -35°C	Les aliments de petit volume sont véhiculés sur une bande transporteuse perforée par laquelle l'air circule de bas en haut : temps de congélation – à 15 min.	Produits en l'état (baies, grins, gousses) ou coupés en morceaux
3- vaporisation de liquide ou de solide en congélation continue	Liquide en cours de vaporisation : Azote liquide à -196°C ou dioxyde de carbone	Le liquide est pulvérisé en direction d'une bande porteuse. La vitesse de congélation est grande	Produits carnés, produits liquides et pateux
4-Procédés de développement récents			
Congélation par immersion	Azote liquide	Congélation ultra- rapide qui peut permettre un croustissage protecteur (boules de crème glacée)	Produits éventuellement concassés : fromages, poissons, jambon, produits pateux
Congélation par malaxage de produit fluide	Azote liquide, dioxyde de carbone solide		Œufs entiers, sauces, jus de fruits, soupes, ...
congélation par dépression	Vide	le produit mouillé, est placé dans une enceinte, un vide est rapidement créé. L'évaporation brutale d'une partie de l'eau absorbe une quantité de chaleur importante et provoque par conséquent la congélation.	Légumes, suspensions bactériennes

II.2. 7/ La Décongélation

La décongélation doit être adaptée au produit : Une décongélation rapide semble préférable pour les produits fragmentés, une décongélation lente est préférable pour les carcasses de viande.

La décongélation doit permettre aux cellules de réabsorber l'eau qui a migré dans les espaces extracellulaires. L'exsudation est inévitable, trop importante (dans le cas d'une décongélation lente), elle va diminuer la qualité organoleptique et nutritionnelle par perte de nutriments hydrosolubles. La multiplication des germes est accélérée dans les aliments décongelés, surtout en surface où l'activité de l'eau est la plus importante (phénomène plus marqué si la température de décongélation est élevée). Pour ces raisons, il est conseillé de décongeler la viande lentement à une température n'excédant pas 4°C.

En pratique, la décongélation est plus lente que la congélation car de crainte de chauffer trop les couches extérieures et de favoriser le développement des microorganismes, on applique un gradient de température plus faible que lors de la congélation

Pour les végétaux, les altérations s'accroissent d'autant plus que la décongélation est lente. Dans les aliments carnés, la décongélation en atmosphère trop humide éclaircit les viandes. Une vitesse de circulation trop importante d'air favorise la formation de métmyoglobine donnant un aspect parcheminé. Pour les volailles, l'hémoglobine de la moelle libérée des globules rouges détruits, traverse les tissus osseux et brunit les tissus autour des os.

Il est, par conséquent, conseillé d'utiliser des produits congelés sans décongélation.

II.2.7.1/ Techniques de décongélation**a) Par réchauffement externe :**

- **Dans l'air :** A l'air froid lentement en chambre froide à 0° à 4°C. Pour les viandes et produits de boulangerie. Le taux d'exsudat est élevé (0,5 à 3%).
- **Dans des armoires à air pulsé :** Dans ce procédé, destiné pour les plats cuisinés, la température, l'humidité relative, la vitesse de circulation d'air ambiant sont variables. L'humidité relative est élevée (90%) pour éviter la dessiccation des produits. Une fois la surface est décongelée, de l'air froide (4°C) est pulsée, le temps de décongélation est réduit à quelques heures.

- **Dans des tunnels ventilés :** Pour les carcasses de viande. L'humidité relative y est élevée pour réduire les pertes par exsudation.
- **A la vapeur, sous vide :** La température de la vapeur est inférieure à 30°C. Ce procédé est appliqué pour une gamme importante de produits. Il est satisfaisant du point de vue nutritionnel, organoleptique et microbiologique.
- **Décongélation par double contact :** les appareils sont proches des congélateurs à plaques pour des aliments fluides.

b) Par réchauffement interne simultané de toute la masse de l'aliment

- **Décongélation par résistance :** le produit de forme régulière, a ses surfaces en contact avec des électrodes auxquelles on applique une tension de 50 à 80 Volts.
- **Décongélation par ultra- haute fréquence (Micro-ondes) :** ce procédé réduit l'exsudation d'une manière très importante, mais il y a risque de cuisson de la surface avant la décongélation de la masse.

La Conservation par déshydratation

De nos jours, la nécessité d'atteindre la stabilité à long terme et la facilité d'utilisation, en plus d'une plus grande fonctionnalité, implique que de nombreux produits alimentaires et ingrédients liquides ou solides sont déshydratés ou transformés mécaniquement en poudre. Les procédés de fabrication des poudres alimentaires exigent toujours la satisfaction d'une série de critères tels que la performance du procédé (efficacité énergétique, coût de production, sécurité du travail et pollution de l'environnement) et la qualité du produit (composition, préservation, sécurité alimentaire, fonctionnalité, etc.).

La déshydratation des aliments est la plus ancienne technique de conservation des aliments. D'après les récits de voyage de Marco Polo, les Mongols fabriquaient de la poudre de lait en faisant sécher le lait au soleil. La déshydratation permet d'éliminer partiellement ou totalement l'eau contenue dans l'aliment. La réduction de la disponibilité (activité de l'eau dite « aw » pour Water Activity) contenue dans l'aliment entrave le développement microbien, arrête les réactions enzymatiques mais aussi diminue le poids et le volume du produit, ce qui constitue une économie importante pour le conditionnement, le transport et le stockage. Toutefois, le prix de revient de l'opération freine sa large application.

La déshydratation peut s'effectuer par :

- ✓ **La concentration** : déshydratation partielle du produit visant à augmenter la masse d'un produit dans l'unité de volume, ceci peut être réalisé par déshydratation partielle. La pression osmotique de l'aliment entrave tout développement microbien.
- ✓ **La deshydratation** : Action d'éliminer, partiellement ou totalement l'eau contenue dans l'aliment
- ✓ **Le séchage** : Elimination de l'excès d'humidité par déshydratation poussée par évaporation d'eau. On aboutit à des produits dits secs. L'aw trop faible (<0,4) entrave tout développement microbien et activité enzymatique.
- ✓ **La lyophilisation** : déshydratation totale par sublimation à basse température et sous vide.

III.1/ Intérêts de la déshydratation

La déshydratation des aliments peut servir à les concentrer, à être une méthode partielle de conservation ou à les conserver. La déshydratation est une méthode de conservation physique et naturelle, simple, peu agressive et économique. Elle permet une facilité de transport et une commodité d'utilisation (purée, café, ...).

La déshydratation peut être appliquée sur plusieurs produits alimentaires par :

- **L'élimination partielle** de l'eau peut être un moyen de conservation si d'autres facteurs favorables à celle-ci s'ajoutent, telle une teneur élevée en sucre ou en sel qui diminue l'activité de l'eau. Fruits secs (moins de 30% d'eau et près de 70% de sucres, laits concentrés sucrés (moins de 30% d'eau et près de 55% de sucres).
- **L'élimination totale de l'eau** permet d'obtenir une conservation longue (l'eau libre et la plus grande partie de l'eau liée sont éliminée ($a_w \leq 0,4$))

III.2/ Conséquences physico-chimiques de la déshydratation poussée de l'aliment

La croissance des MO est stoppée, l'activité enzymatique du milieu est fortement ralenti, de même que les réactions d'hydrolyse, le brunissement enzymatique et l'oxydation des lipides. Les produits déshydratés ne sont pas stériles, toute réhydratation accidentelle sera néfaste (Nécessité d'un conditionnement étanche).

III.2.1/ Réactions au cours de la déshydratation

Certaines réactions peuvent se produire au cours de la déshydratation :

- Evaporation des substances aromatisantes (volatiles)
- Oxydation des pigments
- Dénaturation des protéines
- Brunissement non enzymatique
- Oxydation des lipides et pertes en vitamines

Ces réactions se traduisent par une altération de la qualité nutritionnelle et organoleptique. Des réactions sont également observées au cours de l'entreposage telles l'oxydation et le brunissement non enzymatique. Le blanchiment préalable des produits et l'ajout d'additifs (dioxyde de soufre) s'avèrent nécessaires pour éviter ces réactions.

III.3/ Les Voies de déshydratation des aliments

Les techniques de déshydratation des aliments sont diverses :

- **La voie mécanique :** La déshydratation s'opère par transfert de quantité de mouvement. Il s'agit de concentrer les produits par centrifugation (jus de tomate), par égouttage (fromages), pressage (fromages à pâte pressée), ultracentrifugation (concentrés de protéines laitières et de blanc d'œuf).
La voie mécanique se caractérise par un caractère limité (60% d'humidité résiduelle) et un manque de sélectivité.
- **Voie thermique :** La déshydratation s'opère par transfert de chaleur. Le séchage peut s'effectuer à l'air (25%) ou industriellement par entraînement de l'eau par la chaleur provenant de :
 - La convection d'un air chaud et sec (procédé Spray)
 - La conduction par contact avec une surface chaude (Procédé Hatmaker)
 - La sublimation d'une glace (Lyophilisation).

III.4/ Séchage par atomisation

La technologie d'atomisation est apparue à la fin du dix-neuvième siècle et elle est toujours considérée comme la principale technologie de production des poudres dans plusieurs domaines variés tels que l'industrie chimique, agro-alimentaire, pharmaceutique, micro-organismes... L'atomisation est aussi une des techniques les plus répandues pour l'encapsulation des ingrédients alimentaires, des huiles essentielles et des arômes.

L'atomisation a comme principaux avantages prépondérants la possibilité de transformer directement les matières premières liquides en poudre sèche. Largement appliquée pour la production de la poudre de lait, selon l'usage ultérieur, différents types de poudres sont obtenues selon la méthode de séchage utilisée (poudres pour la reconstitution, utilisées en boulangerie, en pâtisserie, fabrication du chocolat ou de crèmes glacées, alimentation animale...).

De nouvelles technologies de fabrication des poudres sont apparues dites de Détente Instantanée Contrôlée (DIC), permettant l'obtention de produits finis de très haute qualité. Cependant, les applications des technologies DIC dans la fabrication des poudres alimentaires restent encore restreintes.

III.4.1/ Procédés utilisés pour l'atomisation

Les systèmes employés en industrie alimentaire pour la conservation par atomisation sont développés dans ce qui suit :

III.4.1.1/ Séchage sur tambours ou cylindres (Procédé Hatmaker)

Le séchage sur cylindres a été introduit en industrie il ya 100ans. Les séchoirs sur cylindres sont constitués d'un ou plusieurs rouleaux cylindriques creux métalliques montés sur des axes horizontaux (figureIII.1). Le diamètre d'un cylindre peut aller jusqu'à 2 m et une longueur de 5 m. Leurs capacités se situent entre 5-30 kg de produit par mètre carré et par heure. La vitesse rotative est comprise entre 1 et 30 tours par minute et le temps de séjour peut être fixé à partir de 2 s à 1 min. L'épaisseur de couche du produit peut être contrôlée en ajustant soigneusement l'espace entre les deux cylindres, allant de 0,05 à 0,5 mm.

Les applications actuelles du séchage sur cylindres s'appliquent pour sécher des aliments pour les animaux, des purées de légumes, la compote de pommes, des céréales précuites ou des mélanges de soupe sèche.

Dans ce procédé, appelé également le séchage de film mince ou le séchage sur rouleaux, le produit généralement sous forme de suspensions, pâtes ou solutions visqueuses concentrées est étalée en film mince sur la paroi externe des cylindres métalliques, chauffés intérieurement est réparti sur des tambours rotatifs chauffés à la vapeur. L'eau contenue dans le lait s'évapore par ébullition et est éliminée par un courant d'air lorsqu'elle entre en contact avec les surfaces chaudes des tambours. Le produit séché, est raclé par un couteau après une révolution, il est récupéré sous la forme d'une feuille mince ou des flocons, qui seront dispersés par passage à travers une vis sans fin pour obtenir une poudre grossière. Le processus de broyage final est effectué pour obtenir une taille souhaitée des particules.

La température élevée dénature les protéines et dégrade la qualité du produit la poudre est moins soluble. Aussi, Il est très difficile de sécher les produits riches en sucre tels que les jus de fruits ou le petit-lait. C'est également un procédé réservé aux produits liquides ou pâteux et ne s'applique pas aux produits riches en matière grasse. Deux types de sècheurs sont distingués :

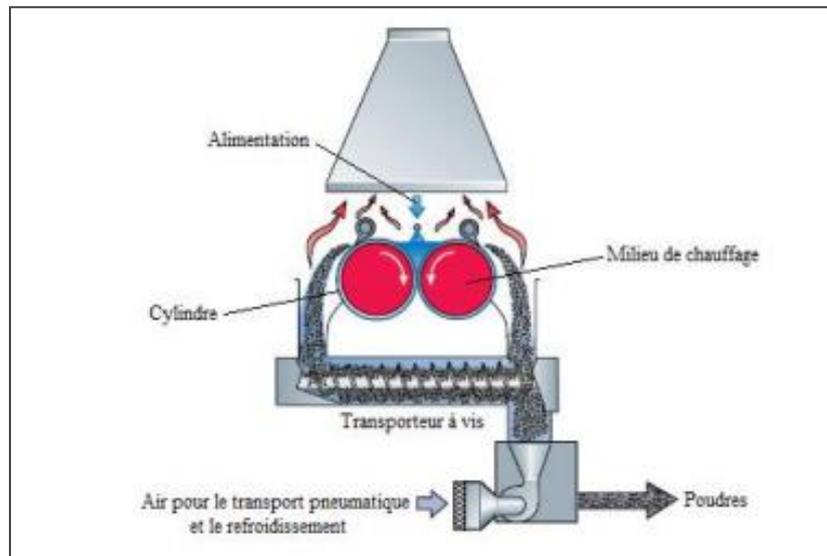


Figure III.1: Principe du séchage sur tambours à deux

a.1) Sécheur alimenté par auge : Le produit prétraité arrive dans l'auge, lorsque la fine couche de produit entre en contact de la surface chaude, elle est chauffée très rapidement. L'eau s'évapore et la couche de lait sèche sur le tambour en formant une pellicule qui est grattée régulièrement avec des raclettes. Le lait séché tombe sur une vis sans fin dans laquelle il est réduit en flocons, les particules dures et brûlées sont séparées par un tamis.

a.2) Sécheur alimenté par pulvérisation : Des buses situées au dessus des tambours pulvérisent une fine pellicule de produit sur les surfaces chauffantes des cylindres. La poudre raclée subie le même traitement.

III.4.1.2) Séchage par atomisation : ou procédé Spray.

La technologie et l'équipement de séchage par atomisation sont apparus à la fin du 19^{ème} siècle. Le séchage du lait a été la première application de la technologie du séchage par pulvérisation. Par la suite, la technologie du séchage par pulvérisation a été perfectionnée continuellement pour s'adapter davantage aux produits thermosensibles. Le premier appareil reconnu était le sécheur à pulvérisation qui utilisait une buse à pression. Le séchage par

atomisation offre l'avantage de transformer directement les matières premières liquides en poudre sèche avec une très basse humidité.

Plusieurs systèmes de séchage par atomisation ou tours d'atomisation existent :

- **Le système ouvert :** l'air est introduit de l'environnement et chauffé dans le réchauffeur, et effectue le transfert thermique une seule fois avec le produit dans la chambre de séchage. Il est ensuite nettoyé par le cyclone et le filtre à manche (**Figure III.2**).

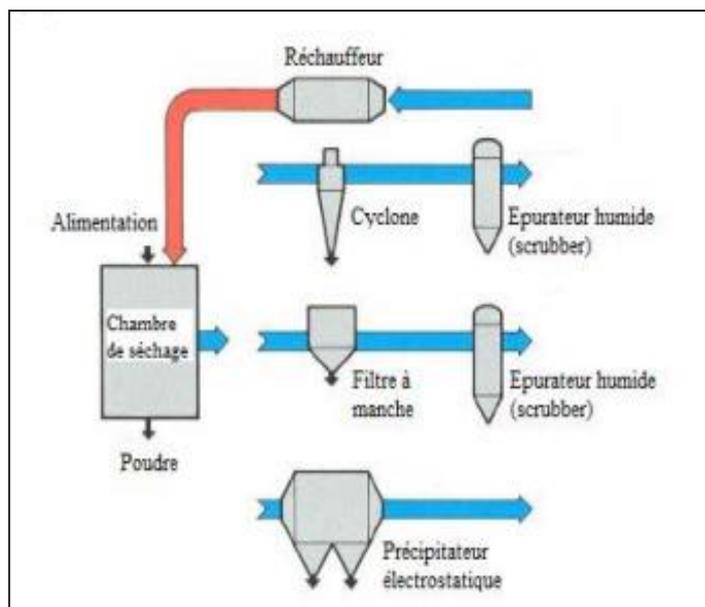


Figure III.2 : Le système de séchage ouvert

- **Le système fermé : ou cycle clos,** ce système est réservé pour les produits sensibles à l'oxygène. Le séchage s'effectue hermétiquement par un gaz inerte (azote).
- **Le cycle semi-clos :** ce système prévient les risques inflammables- explosifs en réduisant la teneur d'oxygène dans la chambre de séchage (Figure III.3).
- **Le cycle aseptique :** Se caractérise par la présence de filtres d'air. Ce système est placé à proximité de la chambre de conditionnement (Figure III.4).

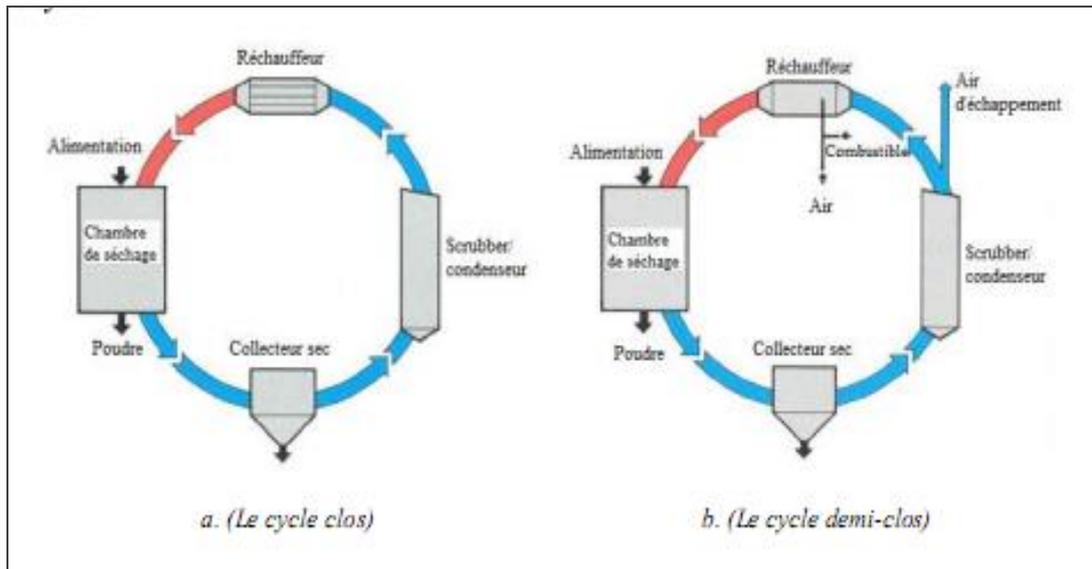


Figure III.3 : Les cycles de séchage clos et semi-clos

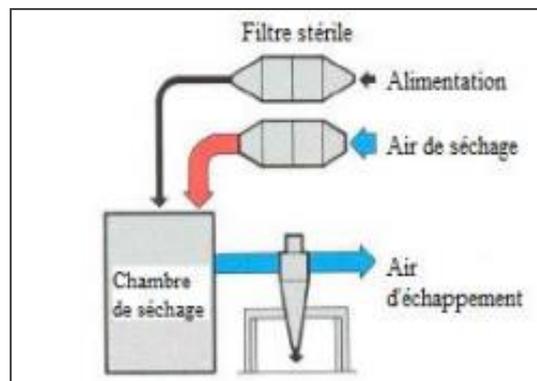


Figure III.4: Le cycle de séchage aseptique

❖ **Principe de fonctionnement de système de séchage par atomisation**

Il y a deux types de sécheurs typiques à pulvérisation, ce sont le sécheur vertical à pulvérisation (ou le type Cyclone) et le sécheur horizontal (ou le type Rogers). La conception du matériel d'atomisation dépend de la granulométrie et des caractéristiques voulues de la poudre (texture, solubilité mouillabilité, structure granuleuse).

Le principe de fonctionnement des deux sécheurs typiques est le suivant :

a) Sécheur vertical à pulvérisation (ou le type Cyclone)

Ce type de sécheur (figure III.5) est très largement utilisé. Le principe de fonctionnement comprend deux étapes :

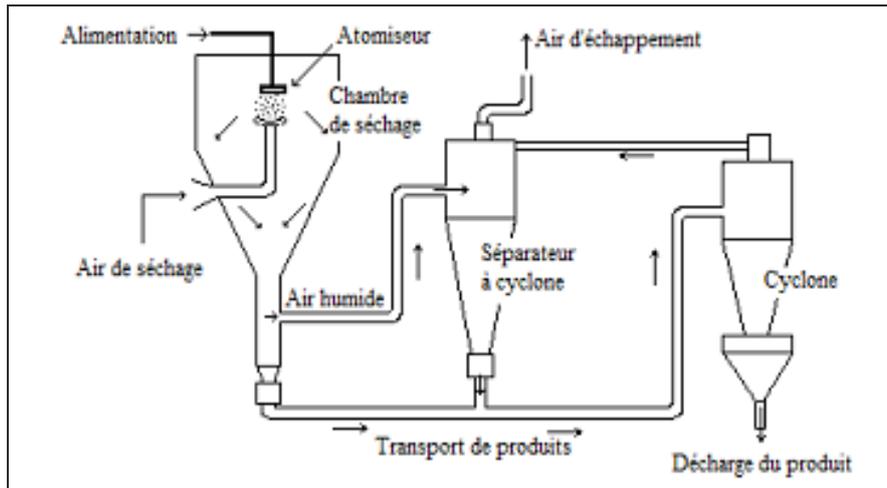


Figure III.5: Sécheur vertical à pulvérisation

a.1) Pulvérisation du produit: La matière première liquide est pompée par des pompes à pression à l'atomiseur (200 bars maximum) et pulvérisée en gouttelettes très fines ; plus leur surface effective est plus grande et plus le séchage est efficace. Un atomiseur idéal est susceptible de créer des gouttelettes fines individuelles avec des tailles égales. La vitesse de transfert de chaleur, de masse et le temps de séchage sont égales pour toutes les gouttelettes, cela assure l'uniformité du produit sec.

a.1.1) Types d'atomiseurs

En fonction de la forme énergétique qui affecte le liquide, plusieurs types d'atomiseurs sont distingués, dont les plus rencontrés sont :

- ✓ **Les atomiseurs rotatifs** (Figure III.6) : Le produit est accéléré par l'énergie centrifuge.

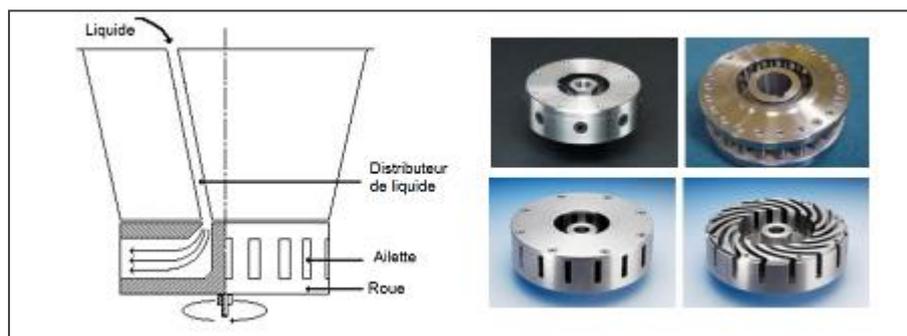


Figure III.6 : Constitution d'un atomiseur rotatif

L'atomiseur à roue est très utilisé dans l'industrie, il peut créer des gouttelettes très uniformes avec toutes les gammes de taille (de la taille fine à la taille moyenne et grosse taille).

- ✓ **Buses à pression :** Le principe de la buse à pression est la conversion de la pression du liquide en énergie cinétique des films de liquide en mouvement.
- ✓ **Buses pneumatiques :** Le mécanisme de l'atomisation pneumatique (Figure III.7) est d'utiliser un gaz à la vitesse élevée pour créer une force de frottement importante sur la surface du liquide et causer la désagrégation du liquide en gouttelettes ; sous l'influence de la tension superficielle du liquide, de la densité, ...

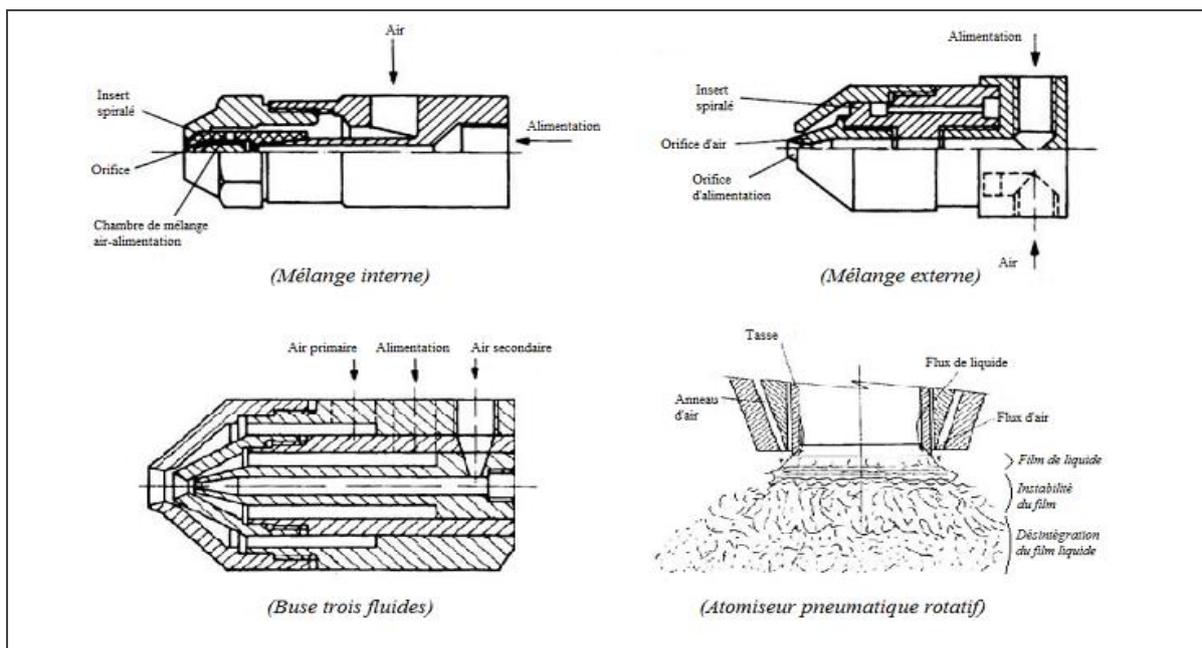


Figure III.7: Quelques exemples de buses pneumatiques

- ✓ **Buse ultrasonique (piézoélectrique) :** L'atomisation ultrasonique est une technique qui est utilisée pour produire, à l'aide des vibrations à haute fréquence, un spray du liquide extrêmement fin, homogène et la taille de gouttelettes est très constante.

a.2) Séchage : Les gouttelettes contactent le flux d'air chaud porté à 150-250°C (le produit n'est chauffé qu'à 70- 80°C puisque la chaleur de l'air est consommée en permanence par l'évaporation de l'eau). qui est soufflé à co-courant ou contre-courant et elles perdent rapidement leur humidité alors qu'elles sont encore en suspension dans l'air de séchage. La poudre sèche est séparée de l'air humide par la force centrifuge dans le cyclone. Les particules de poudre sont forcées à diriger vers le mur du cyclone, se déposent au fond du cyclone où elles sont transportées à la sortie, alors que l'air humide plus léger se dirige vers le tuyau d'évacuation. La poudre poreuse et agglomérée passe par un tamis pour être réduite à la granulométrie désirée.

Remarque : Le lait destiné à la fabrication de poudre de lait ne doit pas faire l'objet d'un traitement thermique intense (pasteurisation haute température), sauf le cas du lait entier (en vue d'inactiver les lipases), qui serait à l'origine de la coagulation des protéines sériques et l'altération des propriétés organoleptiques de la poudre de lait

a.2.1) Les types de chambres de séchage

✓ Chambre de séchage à co-courant:

Le flux d'air est soufflé à co-courant avec le produit, ce type de chambre de séchage est appliqué pour les produits thermosensibles (figure III.8).

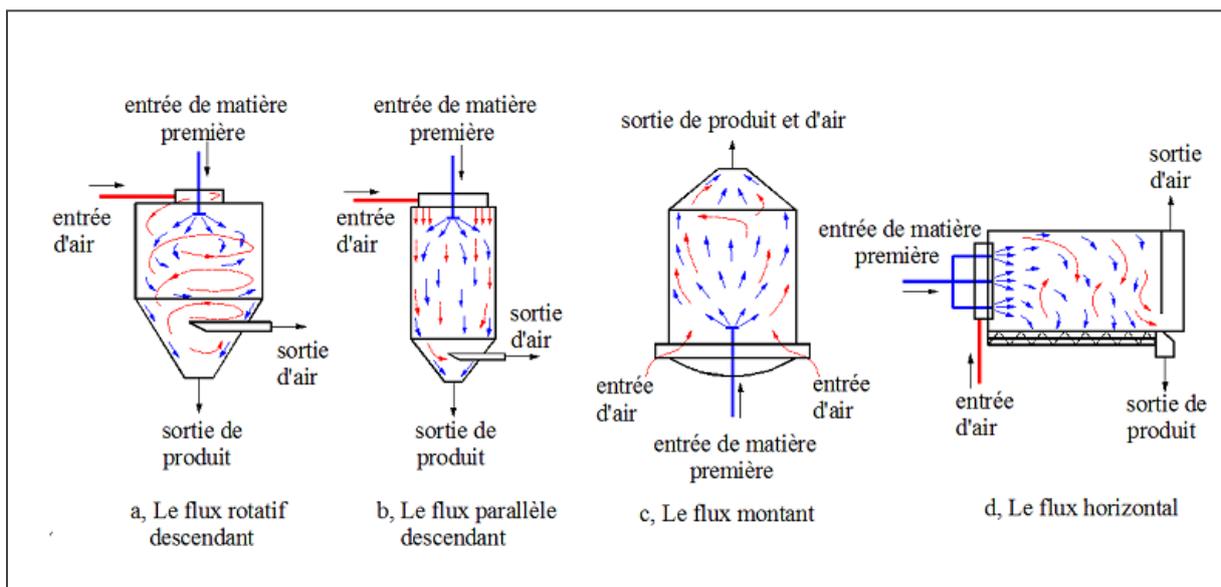


Figure III.8: Types de chambres de séchage à co-courant

✓ **Chambre de séchage à contre-courant:**

Le flux d'air est soufflé à contre-courant avec la matière première (figure III.9). Ne convient pas pour les produits thermosensibles susceptibles de subir une dégradation thermique et une perte de couleur et d'arôme.

✓ **Chambre de séchage à flux mixte:**

Le flux d'air est soufflé à la fois co-courant et contre-courant avec le produit (figure III.10).

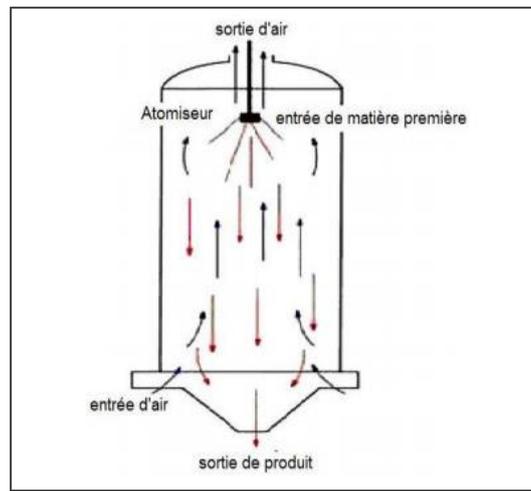


Figure III.9: Chambre de séchage à contre courant

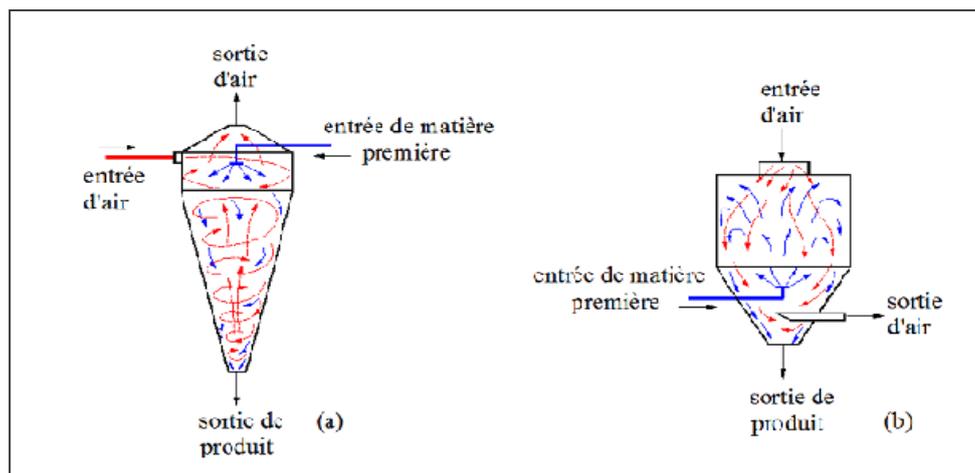


Figure III.10 : Chambre de séchage à flux mixte

b) **Sécheur horizontal à pulvérisation (ou le type Rogers)**

Ce schéma est moins répandu, utilisé seulement pour les poudres sensibles qui ne sont pas susceptibles de résister à la friction engendrée par l'activité du cyclone. La dispersion de la poudre est réalisée par un convoyeur à vis (figure III.11).

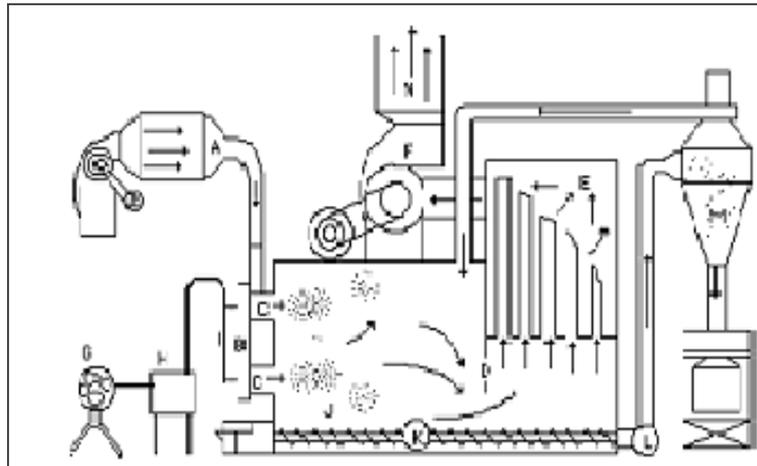


Figure III.11: Sécheur horizontal à pulvérisation. A : Tuyau, B : Disperseur d'air, C : Chambre de séchage, E : Filtre, F : ventilateur, G : Réchauffeur, H : pompe, K : Convoyeur à vis.

▪ Fabrication de la poudre instantanée

Dans le cas du lait pour allaitement, il est important d'obtenir des poudres de lait instantanées qui permettront une dissolution très rapide. Les particules de lait doivent être traitées pour obtenir des agglomérats poreux et plus gros (séchage remplaçant l'eau par de l'air et humidification des particules par la vapeur d'eau) L'instantanéisation la plus efficace est obtenue à l'aide d'un lit fluidisé (figure III.12).

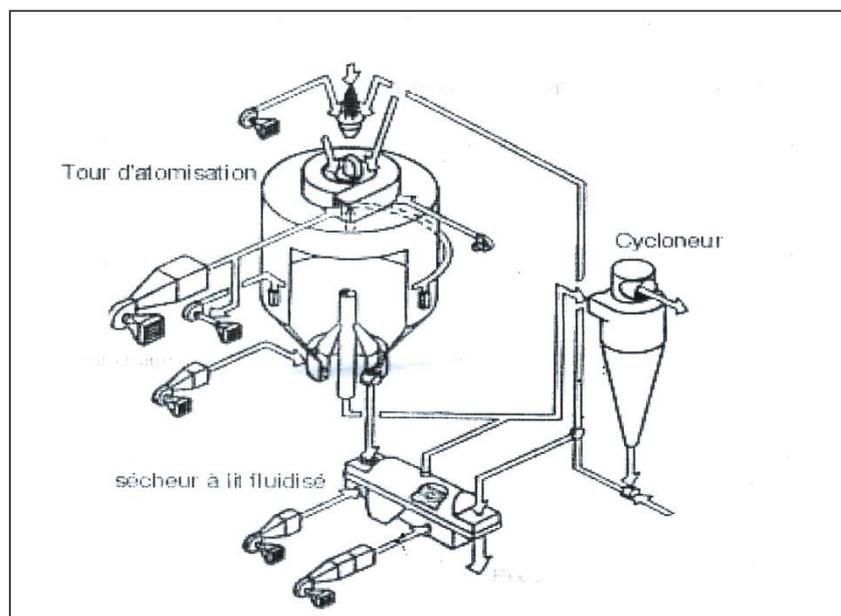


Figure III.12 : Installation d'atomisation à lit fluidisé

III.4.2/ Facteurs influençant l'opération de séchage par atomisation

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur l'efficacité du séchage par atomisation, tels la viscosité du produit, la taille de l'orifice de l'atomiseur, de la pression, du débit d'alimentation, la teneur en matière solide du liquide, la tension superficielle, l'humidité, ...

III.4.2 .1/ Temps de séchage des gouttelettes

Le temps d'évaporation réelle des gouttelettes à une température fixe de l'air dépend de la forme des gouttelettes, de la composition chimique, de la structure physique, et de la concentration de solides. Le temps réel est la somme de la période à vitesse constante et la période à vitesse décroissante jusqu'à ce que l'humidité désirée soit atteinte. Les caractéristiques générales de séchage sont illustrées par la courbe de vitesse de séchage (Figure III.13).

- Dans la phase AB: la vitesse de séchage est immédiatement établie dès que les gouttelettes entrent en contact avec l'air de séchage. La température de surface des gouttelettes augmente légèrement; et la vitesse de séchage croît dans les millisecondes nécessaires pour le transfert de chaleur à travers l'interface gouttelette-air pour établir un équilibre.
- Dans la phase BC: les conditions d'équilibre dynamique sont représentées. Le séchage progresse avec une vitesse constante qui est la plus grande vitesse atteinte au cours de l'évolution de séchage des gouttelettes.

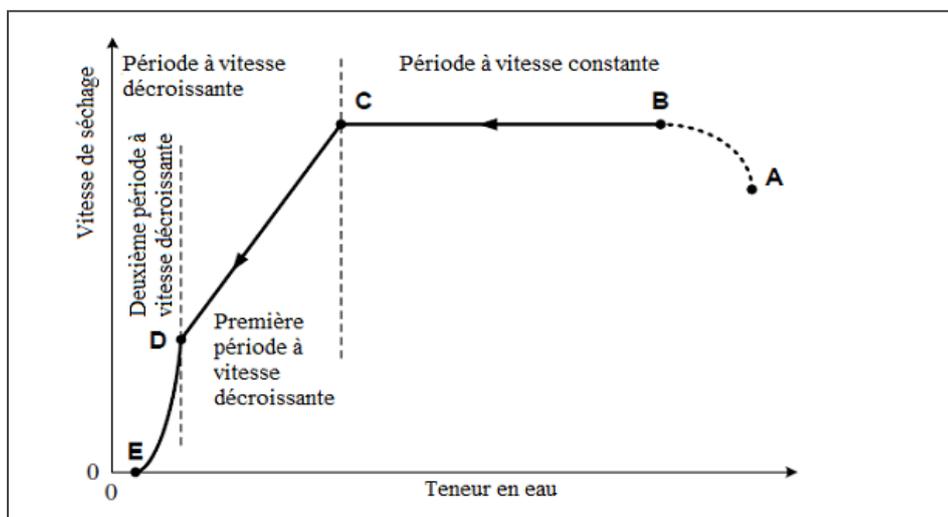


Figure III.13: Courbe de vitesse de séchage

III.5/ Avantages et inconvénients du procédé d’atomisation

Comparé aux autres techniques de séchage des poudres (sur rouleaux ou cylindres, en tambour ou en mélangeur), le séchage par pulvérisation présente des avantages et des inconvénients suivants :

III.5.1/ Les avantages de la technologie du séchage par pulvérisation

- Transformation des matières premières liquides en poudre sèche avec une très basse humidité.
- Forme des particules très souvent régulière, sphérique et leur granulométrie resserrée.
- Possibilité d’application vis à vis des matières thermosensibles.
- Durée de séchage courte.
- Possibilité de traiter plusieurs produits : en solution, émulsion ou pâte...

III.5.2/ Inconvénients de la technologie de séchage par pulvérisation

- Frais d’investissement assez élevés.
- Nécessiter l’évaporation de grandes quantités de solvants. ce qui constitue un frein à son développement pour les produits de faible valeur ajoutée.
- Nécessité d’opérateur hautement qualifiés, sinon le produit est facilement dégénéré (la perte d’arôme et de couleur).
- Difficulté de récupérer 100% du produit sec.
- Exigence régulière d’hygiène et d’entretien des machines.

Toutes les méthodes de séchage employées, sur cylindre ou par atomisation reposent sur l’apport de chaleur au produit, mais les caractéristiques de la poudre obtenue est différente (Tableau III.1).

Tableau III.1 : Propriétés de la poudre de lait séchée sur cylindre et par atomisation (Valeur maximale)

Propriétés	Séchage par atomisation	Séchage sur cylindre
Matière grasse	1,25%	1,25%
Humidité	4%	4%
Acidité titrable	0,15%	0,15%
Indice de solubilité	1,25	15
Estimation bactérienne	50000/g	50000/g
Particules carbonisées	15 mg	22,5mg

La lyophilisation

(Cryodessiccation)

Étymologiquement, le mot « lyophile », de racines grecques « lyo- » et « -phile », signifie «qui aime les solvants ». En effet, un produit lyophilisé se présente sous un aspect solide, friable et poreux, et se caractérise notamment par son avidité importante en eau.

La lyophilisation ou cryodessiccation est une opération de déshydratation à basse température qui consiste à éliminer la majeure partie de l'eau contenue dans le produit ; le poids du produit est réduit au maximum. Ce procédé autorise une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'activité de l'eau. La lyophilisation permet d'obtenir des produits de haute qualité : la forme, l'aspect et la qualité aromatique des produits sont bien conservés, aussi les produits lyophilisés offrent l'avantage d'une réhydratation instantanée (l'élimination de l'eau se produit sans perturber la forme ni la composition des cellules).

Ce sont les Incas du Pérou qui, vers 1100, utilisèrent les premiers cette méthode pour faire sécher la viande. Ils mettaient à profit les conditions climatiques particulières aux hauts plateaux des Andes : en effet, en haute altitude, l'air est froid et la pression est basse, la viande se desséchait donc par sublimation il s'agissait alors de la lyophilisation naturelle à haute pression. En 1906, les deux physiciens français Bordas et d'Arsonval, décrivent un appareil permettant de réaliser cette sublimation ; grâce notamment au principe de Wollaston et Leslie qui avaient montré la possibilité de sublimer la glace à l'état de vapeur sous une pression très réduite. La lyophilisation fut appliquée d'abord en médecine et en pharmacie (vaccins, sérums,...), ce n'est toutefois qu'en 1960 qu'elle fut appliquée en industrie alimentaire.

En raison de son coût élevé, la lyophilisation ne s'applique que pour les produits ayant une forte valeur ajoutée, café, herbes, aromates, les plats cuisinés, les viandes, les produits de mer.

III.6/ Principe de la lyophilisation

La lyophilisation exploite une propriété de l'eau : En dessous de son point triple (température 0°C, pression 4,6 mmHg) (figure III.14), la glace s'évapore. Les changements d'états (solide- liquide vapeur) dépendent de la température et de pression.

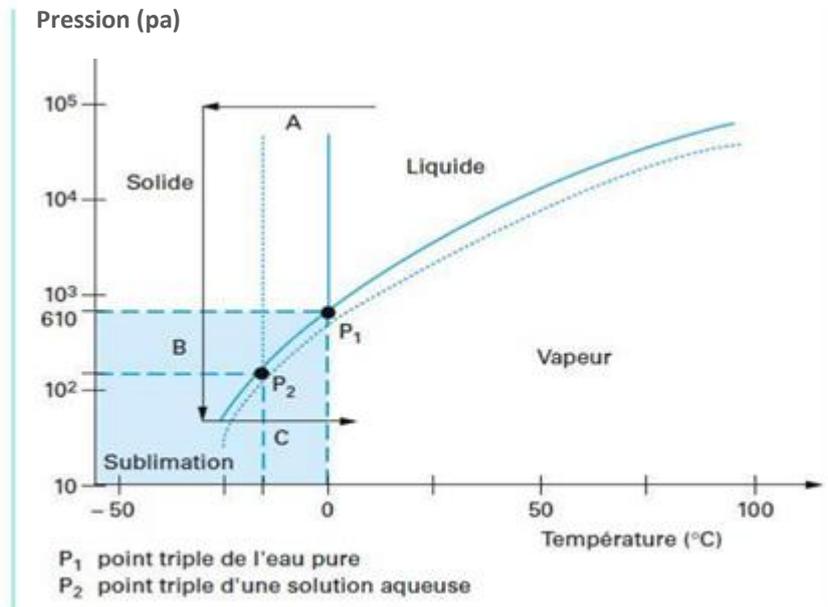


Figure III.14 : Diagramme représentatif des différents états de l'eau

Un Lyophilisateur typique (figure III.15) a trois principaux composants, une pompe à vide, une chambre de séchage et un condenseur :

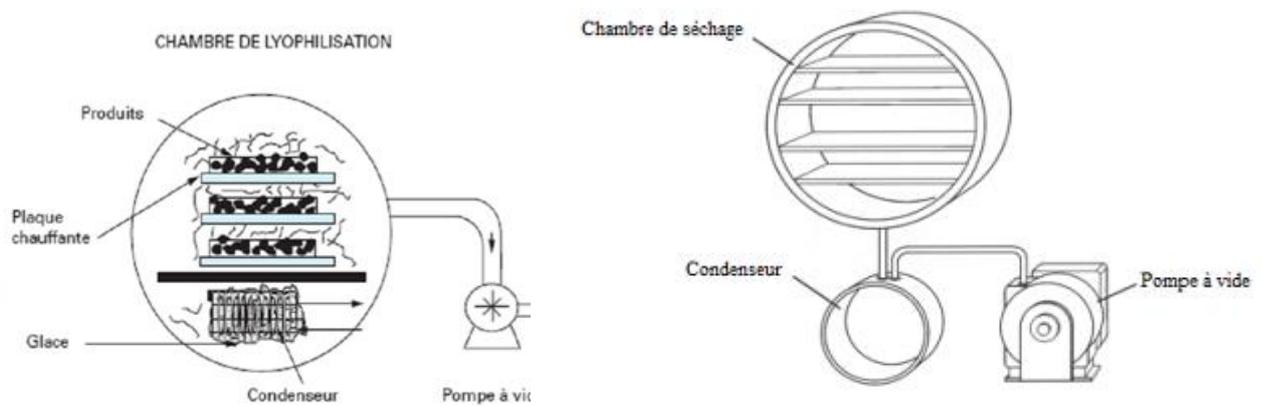


Figure III.15: Système typique de lyophilisation

- **La chambre de séchage :** contient les matériaux séchés sur les plateaux et les plaques chauffantes qui fournissent l'énergie nécessaire à l'opération de lyophilisation (sublimation et désorption) par transfert de chaleur par conduction. La chambre est refroidie par les systèmes de réfrigération.
- **Le condenseur :** Quand la glace commence à sublimer, la vapeur d'eau est transportée à travers la chambre de séchage vers le condenseur réfrigéré. Deux types sont disponibles: une chambre refroidie avec un système de réfrigération mécanique ou une autre refroidie avec le méthanol/glace sèche ou l'azote liquide.
- **La pompe à vide:** Les pompes à vide retirent l'air et la vapeur d'eau de la chambre de séchage afin de créer le vide. La capacité de pompage est importante (la quantité d'air et de vapeur d'eau que la pompe peut retirer par minute), elle contrôle la vitesse à laquelle le système peut être évacué.

III.6.2/ Cycle de la lyophilisation

Pour lyophiliser un produit, il faut se placer dans les conditions de lyophilisation, les étapes décrivant ce cycle sont :

- a) Préparation et prétraitement
- b) Congélation rapide
- c) Mise sous vide
- d) Sublimation ou dessiccation primaire
- e) Désorption ou dessiccation secondaire
- f) Remise à pression atmosphérique

Le processus est détaillé ci-dessous :

a) Préparation et prétraitement

Dans la mesure où la lyophilisation du produit est très coûteuse, il importe de réduire le temps de séchage. Pour un produit liquide, il est possible d'effectuer une pré-concentration. Dans le cas des produits solides (fruits, légumes, viandes, poissons), il importe de réduire la durée en les divisant (découpage, râpage, broyage...) de manière à augmenter les surfaces de transferts (il est souhaitable de traiter des fragments de grande surface et de faible épaisseur). Aussi, la durée de la

lyophilisation dépend de l'épaisseur du produit, pour cela il importe de travailler sur couche mince.

Certains légumes subissent au préalable un blanchiment par la vapeur en vue d'inactiver les enzymes.

b) Congélation rapide

Avant lyophilisation, le produit doit être congelé rapidement afin d'éviter la formation des gros cristaux. La vitesse de congélation est généralement comprise entre 0,5 – 3 cm/h. Cette opération permet également de freiner la détérioration du produit avant sa lyophilisation. Cinq techniques sont aujourd'hui employées industriellement :

- ✓ la congélation par dépression,
- ✓ la congélation par ventilation (projection d'air refroidi),
- ✓ la congélation par contact (azote, plaques refroidies et réchauffées successivement...),
- ✓ la congélation mixte par ventilation et contact,
- ✓ la congélation par immersion.
- ✓ La congélation interne (installation à l'intérieur de la chambre de lyophilisation).

c) Mise sous vide

La mise sous vide est réalisée par abaissement de la pression totale dans l'enceinte en éliminant l'atmosphère qui se trouve dans l'installation de 760 mm Hg à 1- 0,3mm Hg (selon le produit et l'appareillage). Ceci est réalisé au moyen de pompes à vides ou de groupes de pompage au vide de gros débit. La mise sous vide permet de finir la congélation.

d) Sublimation ou dessiccation primaire

La sublimation est un changement d'état au cours duquel un corps passe directement de l'état solide à l'état gazeux sans passer par l'état liquide. C'est une réaction endothermique. Il est donc nécessaire d'apporter au produit congelé, de la chaleur. Celle-ci est apportée par les plaques chauffantes (parcourues par un fluide caloporteur) qui se trouvent dans les chambres de lyophilisation. La vapeur d'eau émise lors de la sublimation est recueillie par le piège à froid ou condenseur maintenu à une température inférieure à celle du produit congelé où la vapeur d'eau s'y dépose sous forme de neige. La sublimation étant continue, la température du produit congelé est maintenue constante par les plateaux chauffants.

La force motrice pour la sublimation est essentiellement la différence de pression entre la pression de vapeur d'eau au front des glaces et la pression partielle de vapeur d'eau dans la chambre de séchage. La vitesse de séchage initiale est élevée en raison de faible résistance au transfert de chaleur et de masse au début. Quand le processus de séchage continue, une couche sèche autour de la matière congelée agit comme un matériau d'isolation, bloquant le transfert de chaleur vers le front des glaces et le transfert de masse à partir du front des glaces.

e) Désorption ou dessiccation secondaire

Cette étape commence quand il n'y a plus de glace dans le produit et l'eau liée dans le matériau de séchage doit être éliminée par dessiccation secondaire appelé « la désorption » qui consiste en une évaporation sous vide en gardant la même pression mais à une température positive (20 à 60°C) tout en prenant en compte la température de dénaturation du produit. Le séchage est maintenu jusqu'à ce que l'humidité du produit atteigne 2 à 10%, suivant produit, l'emballage, les conditions de conservation et l'utilisation ultérieure du produit lyophilisé.

c) Cassage du vide

Afin de ramener la chambre de lyophilisation à pression atmosphérique, une fuite est ouverte permettant de combler progressivement le vide. Le produit lyophilisé ayant un fort pouvoir d'absorption, il est préférable de casser le vide sous un gaz neutre (azote ou CO₂).

Il est important de procéder au dégivrage pour « vider » le piège à froid de toute l'eau condensée. Le dégivrage final peut se faire simultanément à la remise de la pression atmosphérique.

d) Emballage : Les produits alimentaires secs doivent être proprement emballés pour éviter l'absorption d'humidité et les réactions d'oxydation des lipides.

III.6.3/ Autres techniques de lyophilisation

a) La lyophilisation avec adsorbants

La vapeur d'eau peut être piégée par adsorption ou absorption sur différents matériaux (P₂O₅, CaCl₂, zéolithes, tamis moléculaire, amidon...). La réaction d'adsorption étant exothermique, l'adsorbant joue le double rôle de piège à eau (abaissement de la pression partielle d'eau) et de source de chaleur. Dans tous les cas, la régénération de l'adsorbant

(zéolithes) est consommatrice d'énergie et nécessite un chauffage à haute température (supérieure à 200 °C).

a.1) Sous vide

Le piège à froid est remplacé par plusieurs colonnes d'adsorbants (zéolithes), c'est le principe de la zéodratation. Il est également possible de récupérer la chaleur libérée par l'adsorption, sur un fluide intermédiaire caloporteur, pour chauffer le produit en cours de lyophilisation (chauffage par conduction), ce qui tend à réduire les coûts de fonctionnement par rapport à la lyophilisation sous vide classique.

a.2) A pression atmosphérique

La lyophilisation peut donc avoir lieu sous pression atmosphérique, sans apport d'énergie. En pratique, la fluidisation sera assurée par un courant de gaz inerte froid et sec. L'immersion directe des produits congelés dans un lit fluidisé d'adsorbants, maintenu à basse température, est une solution pour réaliser la sublimation à pression atmosphérique (Annexe 3). Ce principe autorise un traitement en continu, l'élimination de la pompe à vide et des sources thermiques réduit le coût d'investissement, mais les transferts de matière à froid est limitée. Une autre limite de la lyophilisation réside dans la séparation du matériau fluidisé et du produit lyophilisé. La mise en œuvre d'un adsorbant approprié (de nature alimentaire) est également un critère important.

III6.4/ Conséquences de la lyophilisation sur la qualité des aliments

- ✓ Bien que la lyophilisation soit une méthode de conservation appliquée en microbiologie pour la conservation les souches microbiennes, elle est toutefois responsable de la destruction d'une quantité importante de la population bactérienne de contamination, se traduisant par une amélioration de la qualité hygiénique.

Il s'agit d'un traitement à froid, les modifications occasionnées par un séchage à température élevée sont négligeables en la lyophilisation.

- ✓ La structure de la glace dans le produit au cours du processus de séchage réduit au maximum le rétrécissement du produit et ainsi favorise une réhydratation rapide et presque complète.

Trois points d'intérêt essentiel sont alors à dégager sur le produit lyophilisé :

- ✓ Intérêt pratique : Poudre instantanée. Le produit lyophilisé est très léger et se conserve à température ambiante dans un emballage étanche plusieurs années.
- ✓ Intérêt sensoriel : gout et arôme préservés
- ✓ Intérêt nutritionnel : Les nutriments et vitamines sont presque intacts, Les vitamines A, B1, B2 et C sont exceptionnellement bien conservées, à un taux très proche du produit frais, et ce même après de nombreux mois de stockage. Les carotènes (très sensibles à la chaleur) ne sont pas affectés par la lyophilisation. Les pertes totales en nutriments, après lyophilisation ne dépassent pas les 10% alors que dans la déshydratation classique elles peuvent atteindre 50%. La lyophilisation conserve pratiquement intactes toutes les qualités du produit frais (caractères organoleptiques, caractéristiques nutritionnelles), alors que les techniques ordinaires, hormis la surgélation, dégradent les protides, caramélisent les sucres, décomposent les substances volatiles responsables de la saveur des produits.

La valeur nutritionnelle d'un produit lyophilisé est comparable à celle d'un produit frais. La préservation de la saveur est un facteur promotionnel des produits lyophilisés.

Il importe d'insister sur deux points très importants :

- Le premier est que la lyophilisation n'est pas un traitement stérilisant, il y a lieu de lyophiliser un produit frais ayant une bonne qualité microbiologique.
- Le second est de conditionner le produit lyophilisé (hygroscopique et poreux) dans un emballage adéquat (à l'abri de la lumière, de la chaleur, la lumière et l'humidité).

Enfin, La durée de conservation des produits lyophilisés dépend tout particulièrement du mode de conditionnement, mais la plupart des produits alimentaires lyophilisés et convenablement conditionnés ont une durée de conservation pratiquement indéfinie (jus de fruits, légumes, lait, café).

La conservation par irradiation : Ionisation des aliments

IV.1 Introduction/ Historique

L'irradiation ou le traitement ionisant des aliments n'est pas un procédé nouveau : en 1898, l'Allemand Reider démontre l'action létale des rayons X ; en 1904, l'Américain Green précise les propriétés stérilisantes du radium ; en 1930, le Français Wurtz dépose un brevet sur la stérilisation des aliments par rayons durs pénétrants. Mais ce n'est qu'en 1970 qu'un intérêt conséquent a été porté à ce procédé. Cet intérêt est également marqué par la mise en place dès 1972 d'un vaste programme international en matière d'ionisation (Karlsruhe). Les experts du comité mixte d'experts FAO et l'OMS (1981) ont affirmé que les aliments irradiés jusqu'à une dose moyenne de 10KGry ne présentent aucun risque de toxicité ; établissant ainsi l'innocuité des aliments irradiés. Depuis lors, l'application de ce procédé en industrie agroalimentaire a été fortement employée.

Une réglementation régit le traitement des aliments par ionisation, il s'agit de la directive cadre 1999/2/CE du Parlement européen sur les denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation et de la Directive de mise en œuvre 1999/3/CE du Parlement européen et du Conseil établissant une liste communautaire de denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation. Ces directives imposent un étiquetage des produits ionisés. Le sigle suivant caractérise ces produits :



Sigle international identifiant
un aliment irradié

IV.2/ Définition

L'irradiation des denrées alimentaires est un procédé physique qui recourt à l'action directe de rayonnements électromagnétiques, électroniques (électrons accélérés) ou photoniques (photons X) d'énergie suffisante permettant d'assurer une qualité optimale sur le plan hygiénique (élimination des bactéries pathogènes telles Salmonella ou Listeria) et de prolonger ainsi la durée de conservation des produits ou encore d'améliorer certaines propriétés technologiques.

IV.3/ Les doses d'ionisation et les domaines d'application

La dose d'irradiation est définie comme l'énergie déposée par les rayonnements dans un échantillon de matière. On appelle débit de dose, la dose délivrée par unité de temps qui s'exprime en gray par seconde (ou en kilo-gray par heure). La dose varie de 0,05 à 10 kGy environ dans le domaine alimentaire.

❖ Les unités de mesure de la dose d'irradiation

- **Energie associée aux électrons : électrons volt (e.V).** $1e.V = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$.
- **Unité d'activité radionucléaire : L'unité SI est le becquerel (Bq).** L'ancienne unité est le Curie (Ci). $1Ci = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.
- **Le Gray (Gy) :** qui correspond à l'absorption d'une énergie de 1joule par kilogramme d'aliment irradié. L'ancienne unité est le radium ($1rad = 10^{-2} \text{ J/Kg}$).

❖ Les domaines d'application

Trois termes sont utilisés pour caractériser les différentes applications possibles :

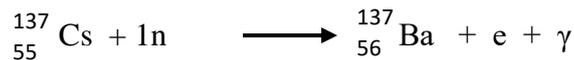
- ✓ **la radurisation :** doses ionisantes permettant la réduction de la charge microbienne du produit en vue d'allonger légèrement sa durée de vie commerciale (doses $\leq 5kGy$),
- ✓ **la radication :** doses d'irradiation suffisantes pour réduire le nombre de micro-organismes pathogènes non sporulés (doses inférieures ou égales à 10 kGy). Le traitement est équivalent à une pasteurisation (radiopasteurisation)
- ✓ **la radappertisation:** application de doses d'irradiation suffisantes (de 20 à 50 Kgy) pour réduire le nombre de microorganismes vivants et les spores (radiostérilisation).

IV.4/ Nature des radiations utilisées

Deux rayonnements principaux ont reçu des applications dans le domaine alimentaire :

- a) **Les rayonnements gamma :** Il s'agit des radiations électromagnétiques de même nature que la lumière mais de fréquence plus élevée (Ils proviennent de la désintégration du Cobalt 60 ou du caesium 137. L'énergie élevée des rayonnements (1,3 KGy) leur confère un fort pouvoir pénétrant (plusieurs dizaines de centimètres). La durée de vie d'un crayon de cobalt est de 5 ans (un rechargement de 12% par an est nécessaire).





- b) **Les électrons accélérés :** Les appareils sont constitués d'un système de production des électrons, d'un système d'accélération, de focalisation et de balayage. L'énergie du faisceau d'électrons est limitée à 10Mev. Les électrons accélérés permettent une rapidité et une souplesse d'utilisation par orientation du faisceau. L'utilisation des électrons accélérés reste limitée aux traitements de surface ou de faible épaisseur en raison de leur faible pénétration.

IV.5/ Installation d'ionisation

Il s'agit d'installations nécessitant une ingénierie spécifique assurant la sécurité des manipulateurs. Relativement coûteuses, elles sont situées dans des zones de production agro-alimentaire utilisatrices de cette technique et obligent un transport souvent onéreux des denrées.

Pour les deux techniques d'ionisation, l'ensemble de l'installation comprend :

- Une casemate en béton (1,8 à 2m d'épaisseur) (a) assurant la protection du personnel ;
- Un système source de rayonnements gamma ou de production et d'accélération des électrons (b)
- Un système de commande, d'automatisme et de control (c) ;
- Un système de ventilation qui élimine les calories et l'ozone formé suite à l'ionisation de l'air ;
- Un système de convoyage : il transporte les produits vers l'accélérateur, les fait défiler dans le flux de rayonnement et les évacue après le traitement (d) (figure IV.1).

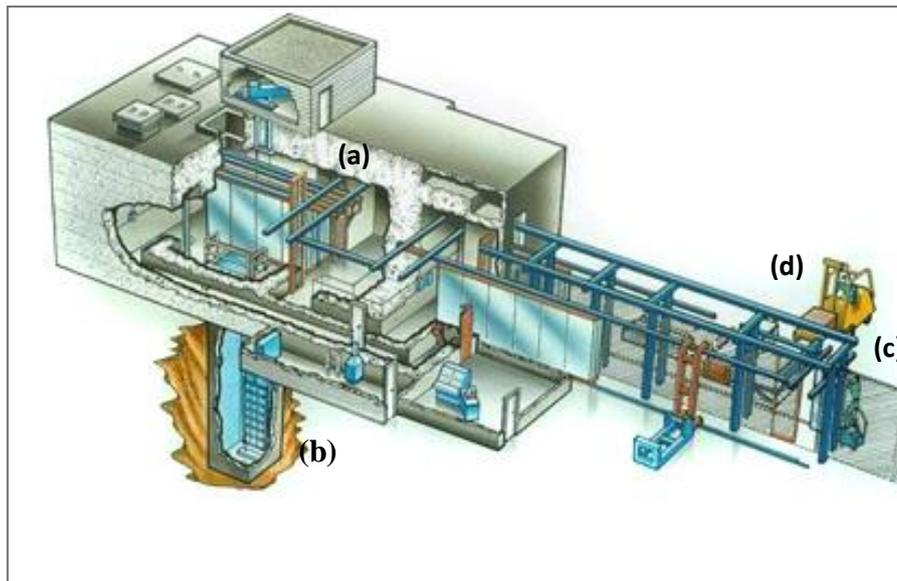


Figure IV.1 : Installation d'ionisation

IV.6 / Mécanismes d'action des rayonnements

Lors de l'application des traitements ionisants à l'assainissement et à la conservation des denrées alimentaires, on emploie des rayonnements qui possèdent une énergie suffisante pour arracher un électron orbital des milieux biologiques irradiés, convertissant ainsi ces atomes en ions positifs et générant dans la substance exposée, une ionisation.

Les rayonnements modifient le milieu qu'ils traversent : l'énergie apportée par le photon peut être simplement absorbée par l'atome, il s'agit alors d'une excitation. Si cette énergie est trop grande pour être absorbée, il se produit une éjection d'électrons dits secondaires : c'est « l'effet Compton » (**Figure IV.2**).

Remarque : Les énergies de ces rayonnements sont certes suffisantes pour arracher un électron aux atomes de la matière rencontrée mais se situent en dessous du seuil d'activation. Ceci veut dire qu'il est impossible d'induire le phénomène de radioactivité dans l'aliment traité.

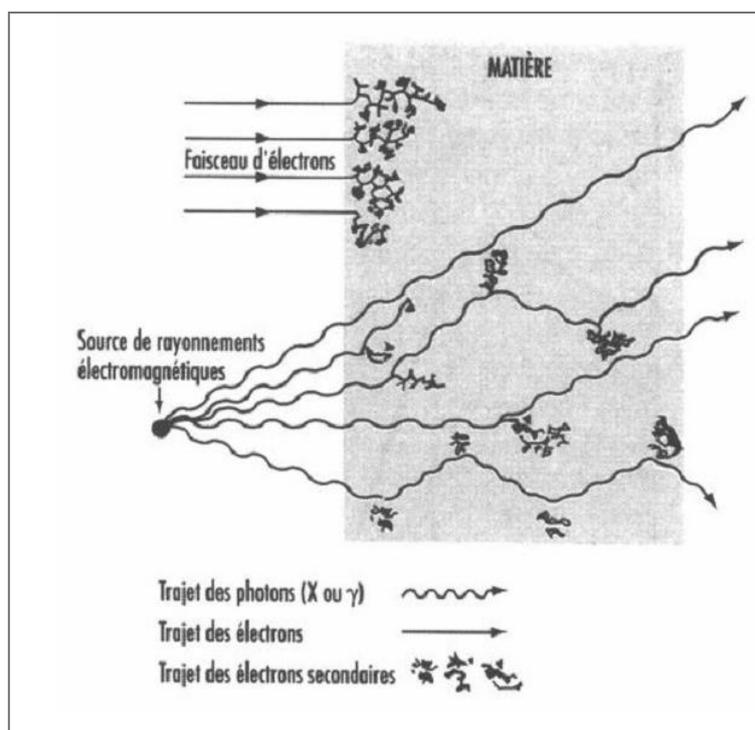


Figure IV.2: Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

IV.6.1/ Effet des rayonnements sur le milieu

Les électrons et les rayonnements γ , ont la propriété de pénétrer différents matériaux auxquels ils apportent leur énergie, provoquant ainsi l'ionisation du milieu traversé. En pénétrant dans un aliment, les électrons accélérés ou ceux formés à partir de rayonnements électromagnétiques (X ou γ), vont perdre leur énergie en interagissant avec les électrons des atomes du milieu traversé. Le processus se maintient jusqu'à ce que l'énergie résiduelle des électrons soit du même ordre de grandeur que celle des énergies de rupture des liaisons covalentes. C'est là qu'apparaissent les produits de radiolyse « effet cage ».

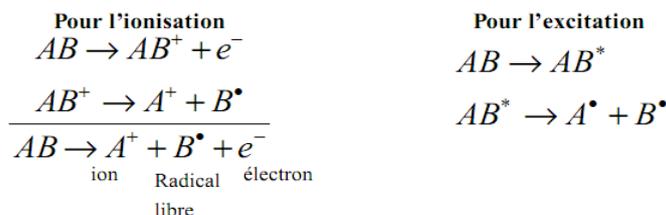
IV.6.2/ Effets chimiques

Les ions moléculaires et les radicaux libres auront un effet différent selon la rigidité du milieu. En milieu solide (où la forte viscosité empêche les ions de migrer), les interactions moléculaires demeurent relativement limitées, seul intervient un effet direct du rayonnement il s'agit de. En milieu aqueux où s'opèrent les recombinaisons liées aux propriétés diffusives du milieu, un effet indirect « radiolyse de l'eau » s'ajoute à l'effet direct.

✓ Effet direct : Mécanismes des réactions d'hydrolyse

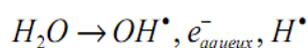
Les processus d'ionisation et d'excitation entraînent la rupture des liaisons chimiques unissant les atomes d'une molécule ainsi que l'apparition de fragments moléculaires

doués d'un grand pouvoir d'oxydation et appelés radicaux libres (notés $X \bullet$).



✓ **Effet indirect : Radiolyse de l'eau et des milieux aqueux**

L'ionisation d'une molécule d'eau provoque la formation de radicaux libres très réactifs dont l'électron célibataire cherche à s'apparier avec celui d'un autre radical.



Des produits de radiolyse se forment (H_2 et H_2O_2) par recombinaison des radicaux libres entre eux ou avec les solutés.

Il convient de noter l'importance particulière de l'oxygène en tant que soluté, car cette molécule biradicalaire est très réactive avec les radicaux libres et les molécules insaturées. Elle forme avec les produits de radiolyse, entre autres, des ponts peroxydes responsables notamment du rancissement des matières grasses en réagissant avec des lipides insaturés. Ces produits de radiolyse sont conséquents à l'irradiation, mais sont de même nature que ceux produits par traitement thermique en moindre quantité.

IV.6.3/ Effets biologique

L'ionisation induit un effet sur les agents d'altération (bactéries, virus, levures et moisissures) par effet direct sur l'ADN et de l'ARN, engendrant des modifications chimiques : hydratation de la cytosine, rupture des chaînes, et des liaisons hydrogène, ... Les rayonnements peuvent être responsables d'oxydations des lipoprotéines membranaires, ce qui bloque la division cellulaire.

La sensibilité des germes à l'ionisation diffère selon :

- ✓ l'espèce, les formes sporulées sont plus résistantes ;
- ✓ L'augmentation de la température diminue la radiorésistance ;
- ✓ La présence d'oxygène augmente la radiosensibilité des germes (par oxydation des lipides) ;
- ✓ L'augmentation du taux de matière sèche augmente la radiorésistance ;

✓ La présence de l'eau, de sels augmente la radiosensibilité des germes.

Le tableau IV.1 donne les doses de réduction décimale des microorganismes les plus courants en agroalimentaire.

Tableau IV.1 : Doses de réduction décimale de quelques microorganismes.

Microorganisme	Dose de réduction décimale (Kgry)
Bactéries Gram + <i>Staphylococcus aureus</i> <i>Streptococcus faecalis</i> <i>Lactobacillus</i>	0,8 à 2 0,2 à 1,5 0,35 à 0,75
Bactéries Gram + sporulées <i>Bacillus subtilis</i> <i>Spores de Bacillus pumilus</i> <i>Spores de Clostridium botulinum</i> <i>Spores de Clostridium perfringens</i>	0,6 à 3,25 1 à 3,6 1,1 à 4 3 à 5
Bactéries Gram – <i>Escherichia coli</i> <i>Salmonella</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Proteus</i> <i>Vibrio</i> <i>Mycobacterium tuberculosis</i>	0,02 à 0,65 0,13 à 1,92 0,03 à 0,3 0,02 à 0,4 0,1 à 0,2 0,15 à 0,25
Levures <i>Saccharomyces</i> <i>Candida</i>	0,05 1,1 à 2,2
Moisissures <i>Penicillium</i> <i>Aspergillus</i>	1,4 à 3,8 1,4 à 3,8
Toxines Toxine de <i>Clostridium botulinum</i> Toxine de <i>Staphylocoques</i>	17 à 60 27 à 95

IV.7/ Effet de l'ionisation sur la qualité des aliments

IV.7.1/ Effets sur la qualité organoleptique

Les modifications induites par les rayonnements ionisants peuvent entraîner une altération de la qualité organoleptique des produits alimentaires, dont l'importance sera fonction de la dose absorbée et de la composition chimique de l'aliment. Ces modifications organoleptiques proviennent de la radiolyse des constituants alimentaires. Ceci ne présente aucun risque pour le consommateur mais rend impossible la commercialisation des produits traités.

La principale altération est le développement de la flaveur « irradiée », principalement due à l'action des rayonnements sur les lipides et les protéines, par augmentation du taux en peroxydes et hydroperoxydes (produits riches en acides gras insaturés) à l'origine de la production des aldéhydes et cétones (odeurs désagréables). Les protéines sont également responsables de l'apparition de mauvaises odeurs dues principalement à la production d'hydrogène sulfuré.

Les recherches ont montré qu'il est possible de réduire l'apparition de ces modifications par :

- ✓ Abaissement de la température lors de l'ionisation ;
- ✓ Ionisation en absence d'oxygène ;
- ✓ Optimisant de la dose d'irradiation ;
- ✓ Stockage et cuisson des produits irradiés.

Mais pour certains aliments, ces phénomènes nécessiteront tout de même une restriction du champ d'application.

IV.7.2/ Effets sur la qualité nutritionnelle

Les doses d'irradiation utilisées ne provoquent que de faibles changements dans la qualité nutritionnelle des produits alimentaires et de faibles proportions des produits de radiolyse formés (0,1 à 0,2 ppm de chaque produit). L'action des radiations est négligeable sur les protéines et sur les glucides. Des réactions d'oxydation sont observés sur les lipides insaturés avec formation de peroxydes à l'origine du rancissement des produits.

Les vitamines les plus sensibles à l'ionisation sont : K, E, B₁, C et A mais les études ont montré que ces vitamines sont largement mieux conservés par ionisation que par traitement thermique.

Remarque : Certains types d'emballages plastiques peuvent, sous l'effet des radiations, libérer des fragments polymériques, il est ainsi recommandé d'utiliser du polyéthylène et du polystyrène qui sont les plus radio-résistants.

▪ Pour les viandes :

Les doses délivrées sont comprises entre 1 et 5 kGy. Une odeur désagréable "de chien mouillé" et une modification de la couleur des viandes exposées apparaît si la dose appliquée est trop importante. Cette limite de dose sera fonction du type de viande exposée ainsi que des conditions de traitement (emballage, atmosphère). Il est possible de repousser cette limite en effectuant une ionisation en atmosphère inerte ou en abaissant la température lors de

l'exposition (-20°C). Aussi, La texture de la viande peut être modifiée (augmentation de la tendreté des viandes ionisées)

▪ **Pour les produits de la mer :**

Pour des doses d'exposition supérieures à 3 kGy, on peut noter l'apparition d'odeurs Désagréables, l'atténuation de la couleur rose du saumon et un durcissement de la texture du homard, pour cela, les doses utilisées ne dépassent donc pas 2 kGy.

▪ **Les fruits et les légumes :**

Pour des doses d'ionisation dépassant 2 kGy, on observe une altération de la texture des fruits (ramollissement). Ce phénomène peut être évité en réalisant une fertilisation calcique en champ, pour les fraises notamment. Le problème se pose moins pour les légumes qui sont, généralement, cuits. Une réduction du temps de cuisson est même observée.

▪ **Les pommes de terre et les oignons :**

Ces denrées sont ionisées afin d'inhiber le processus de germination. Les doses d'exposition étant faibles (0,1 kGy), on n'observe que très peu de modifications organoleptiques. On peut observer pour les pommes de terre une légère augmentation de la saveur sucrée lors d'une conservation prolongée. Quant aux oignons, il a été parfois noté une diminution de leur pouvoir lacrymogène et de leurs propriétés astringentes suite à leur traitement.

▪ **Le lait et les produits laitiers :**

Ces produits sont sujets à l'apparition d'odeurs désagréables à la suite d'un traitement ionisant, et cela pour des doses assez faibles (0,05 kGy). Ce phénomène explique le peu d'intérêt que présente l'ionisation pour ce genre de produits.

Le tableau IV.2 rassemble les effets des radiations sur différents produits alimentaires :

Tableau IV.2 : Effets des radiations sur les produits alimentaires

Produit	Dose	effet
Légumes secs, graines de céréales	75 Krad	Désinsectisation et destruction des bactéries
Pommes de terre, oignons, carottes	15Krad	Inhibition de la germination
Fruits, épices, œufs, sucre		Retard de la maturation (action sur les enzymes), destruction des moisissures
Pain, gâteaux	20- 50 Krad	Destruction des germes en surface.
Viandes, volailles	100- 200 Krad	Destruction des <i>Pseudomonas</i> , <i>Salmonelles</i> et du ver <i>Trichinas</i>

IV.8/ Détection des aliments ionisés

Il paraît nécessaire de disposer de méthodes permettant la détection des aliments ionisés. Nombreux autres. Apporter la preuve de l'ionisation, c'est donc se donner les moyens de valider l'étiquetage des produits traités (lutte contre les fraudes). La non spécificité des produits de radiolyse rendait la détection difficile mais ces dernières années, une série de méthodes efficaces a été développée qui permettent de détecter des modifications radio-induites :

IV.8.1/ Méthode de criblage (test de comète d'ADN)

Cette méthode se base sur l'électrophorèse par micro-gel de cellules simples ou de noyau pour détecter la fragmentation éventuelle de l'ADN résultant d'une ionisation. Les fragments d'ADN endommagé forment une queue en direction de l'anode donnant ainsi l'aspect d'une comète. Cette méthode est efficace sur des produits d'origine animale ou végétale.

IV.8.2/ Thermoluminescence

Cette méthode est appliquée aux épices et aux légumes déshydratés, elle est basée sur la mesure de la lumière émise par la dé-excitation thermique des électrons secondaires. L'intensité de la thermoluminescence est fonction de la dose d'ionisation, du temps de stockage et de la température de chauffage.

IV.8.3/ La résonance paramagnétique électronique

La RPE est basée sur le pouvoir magnétique des électrons célibataires si la dose est supérieure à 1KGry. Cette méthode est applicable sur les os des viandes et les arêtes de poissons, les œufs, les coquillages

IV.8.3/ Méthodes chimiques

Il s'agit d'une analyse du profil chromatographique des acides gras par CPG et la détection de produits de radiolyse directement liés au produit d'origine. De même, sont formés à partir des lipides des cyclobutanones (hydrocarbures volatils) dont la structure est liée au lipide d'origine. Cette méthode est donc réservée aux produits riches en triglycérides (huiles et viandes).

Série de TD

Exercice N°1 :

On considère la destruction thermique des spores de *Clostridium botulinum*. Une réduction décimale de 10^{10} est obtenue :

- Soit par une température de 105°C appliquée pendant 103 min ;
- Soit par une température de 117°C appliquée pendant 6,5 min.

1) Évaluez les temps d'action à appliquer pour obtenir le même résultat aux températures de 100°C et 120°C .

2) Calculez la durée de réduction décimale à $121,1^{\circ}\text{C}$.

3) Partant d'une population de 10^{12} spores, combien de spores vivantes restera-t-il :

- Après application d'une température de 100°C pendant 1 heure ?.
- Après application d'une température de 120°C pendant 20 min?.

4) Quelle température appliquer pour avoir en 50min une réduction décimale de $n=10$?.

Exercice N°2 :

Un vin est flash pasteurisé à 72°C pendant 15 secondes.

- 1) Quelle est la valeur pasteurisatrice atteinte sachant que le nombre d'unités de pasteurisation est calculé sur la base d'une température de référence de 60°C , avec $Z=7^{\circ}\text{C}$.
- 2) *Lactobacillus fructidevorans* a, dans le vin, une durée de réduction décimale à 60°C de 1,7 min.
 - Quel est le taux de réduction décimale obtenu par cette flash pasteurisation ?.
- 3) Par suite d'un léger dérèglement de la régulation de la température, on pasteurise à 71 au lieu de 72°C , quel est le nouveau taux de réduction décimale ?.

D^r Mettouchi- Tamendjari S.

Exercice N°1 :

1) temps d'actions à 100 et 120°C :

On prend : $T_{ref} = 117^\circ\text{C}$ et $F = t_{ref} = 6,5\text{min}$

Sachant que : $F = t_{ref} \cdot 10^{(T-T_{ref})/Z}$

Il ressort que : $Z = (T - T_{ref}) / \log F / t_{ref} = (T_{ref} - T) / \log t / F$

A.N : $Z = (117 - 105) / \log 103 / 6,5 = 10^\circ\text{C}$.

$t = F \cdot 10^{(T_{ref}-T)/Z}$

A.N : $t = 6,5 \cdot 10^{(117 - 100)/10}$

$t_{100^\circ\text{C}} = 326\text{ min}$

$t_{120^\circ\text{C}} = 3,26\text{min}$

2/ temps de réduction décimale à 121,1°C

$D = F/n$

$F = t_{ref} \cdot 10^{(T-T_{ref})/Z}$ donc : $t_{121,1} = t_{ref} \cdot 10^{(T-T_{ref})/Z}$

A.N : $t_{121,1} = 6,5 \cdot 10^{(-121,1-117)/10} = 2,53\text{ min}$.

$D = 2,53/12 = 0,21\text{ min}$.

Remarque : Lorsqu'on applique un traitement pendant nD , la population microbienne est divisée par « n ».

3/ Calcul de la température

$T = D \log N_0/N$, $N = N_0 \cdot 10^{-t/D}$

A.N : $N_{100} = 10^{12} \cdot 10^{-60/D}$

Il faut d'abord calculer $D_{100^\circ\text{C}}$: $\log D_2/D_1 = 1/Z (T_1 - T_2)$

D'où : $D_2 = D_1 \cdot 10^{(T_1 - T_2)/Z}$ Donc $D_2 = 0,21 \cdot 10^{(121,1 - 100)/10}$

il en ressort : $N_{100^{\circ}\text{C}} = 6 \cdot 10^9$ spores.

Même procédure pour $T = 120^{\circ}\text{C}$ et $t = 20\text{min}$

$N_{120^{\circ}\text{C}} = 8,4 \cdot 10^{-63}$ spores

Conclusion : le premier traitement est inefficace alors que le second assure une stérilité absolue.

4/ calcul de la température :

$D_T = F/n = 50/10 = 5 \text{ min}$

$\text{Log } D_T - \text{log } D_{T_{\text{ref}}} = 1/Z (T - T_{\text{ref}})$

D'où : $D_T = D_{T_{\text{ref}}} \cdot 10^{(T-121,1)/10}$

$$T = 121,1 + 10 \log 0,21/5 = 107^{\circ}\text{C}$$

Exercice N°2 :

1) la valeur pasteurisatrice :

$t_{60^{\circ}\text{C}} = t \cdot 10^{(T-T_{\text{ref}})/Z}$

A.N : $t = 15/60 \cdot 10^{(-60-72)/7}$

$t = F = 12,9 \text{ min}$

2) Taux de réduction décimale

$n = t/D = 12,9/1,7 = 7,6$

3) Nouveau taux de réduction décimale après dérèglement de la température

$\text{Log } D_1 - \text{log } D_2 = 1/Z (T_2 - T_1)$

Le dérèglement de la température entraîne une variation du temps de réduction décimale, calculer d'abord $D_{71^{\circ}\text{C}}$:

$D_{71^{\circ}\text{C}} = 1,7 \cdot 10^{(-71-60)/7} = 0,0456 \text{ min}$

D'où : $n_{71^{\circ}\text{C}} = 15 / (60 \cdot 0,0456) = 5,48$.

Conclusion : Un écart de 1°C entraîne une diminution du taux de réduction de 7,6 à 5,48.

Références bibliographiques

Academy de Lyon. ED113. La conservation par le froid.

Amrouche T. 2018. Biochimie, qualité et conservation des aliments. Editions Universitaires Européennes. ISBN : 978- 3- 330- 87471- 8.

Barbosa Abidi H., Zuniga R., Lehebel N., Zuber F., Duquenoy A. 2011. Les traitements thermiques à température variable: optimisation par la simulation numérique. Applications aux foies gras. Viandes et produits carnés :1-12. HAL-01192558.

Bath N. 2012. Food preservation techniques. Video Education Australasia Pty Ltd.

Baziot L ; 2011. Concepts de Genie alimentaire : Procédés associés et application à la conservation des aliments. Edition Techniques et Documentation. ISBN : 978-274301-39-36.

Beresfort H. 1976. Recent developpement in Spray drying. Journal of dairy technology, 29 : 181- 186.

Cheroual E.A. 2020. Méthodes de conservation des aliments et emballages alimentaires. Département de pharmacie. Université Ferhat Abbas- Setif : 1- 11.

Clinquart A. 2005. Les techniques de conservation des aliments. Département des Sciences des denrées alimentaires (sect. Technologie), Université de Liège, Faculté de Médecine vétérinaire.

Duc Quang Nguyen. 2014. Étude comparative expérimentale des opérations d'atomisation et d'autovaporisation: application à la gomme arabique et au soja. Génie des procédés. Université de La Rochelle,Français. fNNT : LAROS010f.ftel-01174999f

Foos J. et Binet G. 2007. L'ionisation des denrées alimentaires.

IFN : Institut Français de Nutrition. 1993. Techniques de conservation des aliments : Appertisation, surgélation ionisation. Dossier Scientifique 2.

Jacquot R. 1954. Traitements thermiques et valeur alimentaire. Annales de zootechnie, INRA/EDP Sciences, 3 (3) :189-214. HAL-00886608f.

Kumar A. 2019. Food Preservation: Traditional and Modern Techniques. Acta Scientific Nutritional Health, 3 (12): 45-49.

Leistner L., 2000. Basic aspects of food preservation by hurdle technology. International Journal of Food Microbiology, 55 : 181-186

Mafart P. 1991. Génie industriel alimentaire Tome 1 : Les procédés physiques de conservation. Technique et Documentation. Lavoisier, APRIA. ISBN : 2-85206-707-2.

Palanché B., 1975. La Lyophilisation dans les industries alimentaires, Compagnie française d'éditions, Paris.

Prosapio V. 2017 . Optimization of freeze drying using a life cycle assessment approach: Strawberries' case study. Journal of cleaner production, 168 : 1171- 1179.

Ratti C. 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review". Journal of Food Engineering, 49: 311-319.

Rougereau A. 1984. influence de la cuisson sur des produits frais, appertisés et congelés. Médecine et Nutrition, 10 : 401-405.

Sharif Z. 2017. "Review on methods for preservation and natural preservatives for extending the food longevity". Chemical Engineering Research Bulletin, 19:145-153.

Toulemonde M.; Desage S. 2009. La Lyophilisation ou Cryodessiccation. Technical Report. Journal of Research gate. DOI: 10.13140/2.1.3636.4807.

Vasseur J. Bimbenet J., Duprat J. et Touron B. 1984. Séchage sur cylindre dans les IAA : Nouvelles techniques, nouvelles perspectives. Industrie Agro-alimentaire, 101 : 911- 919.

Wolff E. Et Gibert H. 1988. Developpements technologiques nouveaux en lyophilisation. Journal of food Energie, 8 : 91- 108.

Zagorec N et Christieans S. 2013. Flore protectrice pour la conservation des aliments. Edition Quae. ISBN : 9782-7592-19-209.

[Webographie](#)

Génie industriel alimentaire en ligne : <http://tech-alim.univ-lille1.fr>