

République Algérienne Démocratique Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université M'Hamad Bougara de Boumerdes  
Faculté de Technologie  
Département de Génie des Procédés

## **Polycopié de cours**

### **Stabilisation des produits alimentaires. Notions fondamentales sur les procédés appliqués**

(Unité Fondamentale-- Domaine Sciences et Technologie — Master LMD)

**Elaboré par :**

**Dr. TRACHI Mahmoud**

**Maitre de Conférence " B ", UMBB**

---

Cours préparés par :

**M. TRACHI Mahmoud**

Maitre de conférences/B- FT, UMBB

# Préfaces

**A**vec plusieurs techniques de conservation des aliments, les plus usuelles aussi bien à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle industrielle, ce document constitue non seulement un ensemble de cours particulièrement destinés aux étudiants de la technologie alimentaire, mais aussi il se considère comme une bonne revue bibliographique dans laquelle sont présentées et détaillées, en plusieurs chapitres, les méthodes les plus sollicitées pour la conservation des produits alimentaires. Le document peut constituer en plus un outil fiable de choix d'utilisation des traitements de stabilisation des denrées alimentaires.

**E**n consultant pas mal d'ouvrages soit lors de la préparation de mes cours ou lors de mes recherches effectuées dans ce sens, j'avais bien constaté le besoin le plus insistant à donner une vision plus englobant sur l'ensemble (possible) des techniques de conservation des aliments et à les réunir en un seul document aisément consultable : souvent, on trouve un nombre limité de méthodes de conservation traitées ou présentées dans un même ouvrage.

**P**ar ailleurs, le contenu du document porte un intérêt particulier en présentant, en plus des techniques de conservation, quelques notions (préliminaires) de bases constituant le fond des méthodes de conservation des aliments. Les notions sont fondamentales et sont un complément intéressant permettant de donner une vision plus précise sur les méthodes. Les illustrations explicatives insérées chaque fois ajoutent une valeur incontestable au document élaboré. Ainsi, le consultant pourrait trouver tous les repères de compréhension et d'avoir un acquis théorique de base.

**L**e document présente également les principales composantes de la qualité d'un aliment, objectifs essentiels visés par l'application de ces techniques.

**L**e présent document est un ensemble de cours destinés, particulièrement aux étudiants, Licence et Master. Il est le fruit de plusieurs années d'expérience en tant qu'Enseignant et Chercheur à l'Université de Boumerdès, à cela, peut s'ajouter le savoir que j'avais acquis,

également pendant plusieurs années, en tant qu'Etudiant (Ingénieur et magister) dans le domaine.

**V**u la qualité du document, je juge qu'il est intéressant que cela soit déposé au niveau de la bibliothèque afin d'être mis à la disposition des étudiants, des Enseignants...

L'Auteur

## Table des matières

### I. NOTIONS PRELIMINAIRES

|                                                                |   |
|----------------------------------------------------------------|---|
| 1. Définition d'un aliment .....                               | 1 |
| 2. Qualité d'un aliment .....                                  | 1 |
| 2.1. Qualité nutritionnelle .....                              | 1 |
| 2.2. Qualité hygiénique .....                                  | 1 |
| 2.3. Qualité organoleptique.....                               | 2 |
| 2.4. Qualité technologique .....                               | 2 |
| 3. Altération des aliments .....                               | 2 |
| 3.1. Altérations microbiennes .....                            | 3 |
| 3.1.1. Facteurs de développement microbien .....               | 3 |
| 3.1.2. Classification des bactéries selon la température ..... | 3 |
| 3.2. Altérations enzymatiques .....                            | 3 |
| 3.2.1. Brunissement enzymatique (BE) .....                     | 3 |
| 3.2.2. Hydrolyse des lipides des glucides .....                | 4 |
| 3.3. Altérations chimiques .....                               | 4 |
| 3.3.1. Brunissement non enzymatique (BNE) .....                | 4 |
| 3.3.2. Oxydation des lipides .....                             | 5 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. Cinétique de réaction et paramètres de prédiction de la durée de vie des aliments ..... | 5  |
| 4.1. Vitesse de réaction .....                                                             | 5  |
| 4.2. Ordre de la réaction .....                                                            | 6  |
| 4.2.1. Réaction d'ordre zéro .....                                                         | 6  |
| 4.2.2. Réaction d'ordre un .....                                                           | 7  |
| 4.3. Effet de la température sur la vitesse de réaction .....                              | 7  |
| 4.3.1. Energie d'activation et loi d'Arrhenius .....                                       | 7  |
| 4.4. Le concept de la valeur $Q_{10}$ .....                                                | 8  |
| 5. Propriétés thermodynamiques des aliments .....                                          | 10 |
| 6. Cinétique de la variation de la température dans l'aliment .....                        | 12 |

## **II. STABILISATION DES ALIMENTS**

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 1. Principe de la conservation .....             | 13 |
| 2. Objectif principal de la conservation .....   | 14 |
| 3. Techniques de conservation des aliments ..... | 15 |

### **II.1. Traitements préalables et traitements principaux**

|                      |    |
|----------------------|----|
| 1. Lavage .....      | 16 |
| 2. Broyage .....     | 16 |
| 3. Blanchiment ..... | 16 |

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Objectifs du blanchiment .....                  | 16 |
| 3.2. Détermination l'efficacité du blanchiment ..... | 17 |
| 3.3. Inconvénients du blanchiment .....              | 17 |
| 3.4. Procédés de blanchiment .....                   | 17 |
| 3.5. Durée et température de blanchiment .....       | 18 |

## **II.2. Traitements thermiques : Pasteurisation et stérilisation des aliments**

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 1. Définition et objectifs .....                        | 19 |
| 2. Procédés du traitement thermique .....               | 19 |
| 3. Paramètres du traitement thermique .....             | 20 |
| 3.1. Choix de la température .....                      | 20 |
| 3.2. Choix de la durée du traitement .....              | 20 |
| 3.2.1. Destruction des microorganismes .....            | 21 |
| 3.2.2. Température du traitement thermique .....        | 24 |
| 4. Barème de stérilisation (ou de pasteurisation) ..... | 27 |
| 5. Efficacité du traitement thermique .....             | 27 |
| 6. Courbes de pénétration de chaleur .....              | 28 |
| 7. La valeur létale .....                               | 31 |

## **II.4. Séchage des aliments**

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Définition et objectifs .....                                                    | 33 |
| 2. Types de procédés de séchage .....                                               | 33 |
| 2.1. Séchage des aliments par entraînement d'air .....                              | 34 |
| 2.2. Paramètres thermodynamiques de l'air humide .....                              | 34 |
| 2.3. Diagramme enthalpique de l'air humide .....                                    | 38 |
| 2.4. Application du diagramme enthalpique lors du séchage des produits alimentaires | 40 |
| 2.5. Courbes de séchage .....                                                       | 41 |

## **II.5. Réfrigération et congélation des aliments**

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 1. Réfrigération des aliments .....                       | 45 |
| 2. Congélation des aliments .....                         | 45 |
| 2.1. Cinétique de congélation .....                       | 45 |
| 2.2. Variation de l'enthalpie durant la congélation ..... | 47 |
| 2.3. Temps de congélation .....                           | 47 |
| 2.4. Procédés de congélation .....                        | 48 |
| 2.5. Effet de la congélation sur les aliments .....       | 49 |

## **II.6. Conservation des aliments par les rayonnements ionisants**

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 1. Définition d'un rayonnement ionisant (RI) ..... | 51 |
|----------------------------------------------------|----|



|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 2. Objectif de l'ionisation .....                             | 51 |
| 3. Sources des rayonnements ionisants .....                   | 51 |
| 3.1. Rayonnement $\gamma$ .....                               | 51 |
| 3.2. Rayonnement X .....                                      | 52 |
| 3.3. Rayonnement corpusculaires (faisceaux d'électrons) ..... | 52 |
| 4. Principe de l'ionisation .....                             | 52 |
| 5. Mécanismes d'action des rayonnements ionisants .....       | 53 |
| 6. Effet des rayonnements ionisants .....                     | 53 |
| 6.1. Formation des radicaux libres (RL) .....                 | 53 |
| 6.2. Effet sur l'ADN .....                                    | 54 |
| 6.3 Effet sur la valeur nutritionnelle .....                  | 54 |
| 7. Dose et débit du traitement ionisant .....                 | 54 |
| 8. Destruction des microorganismes.....                       | 55 |

## **II.7. Autres techniques de stabilisation des aliments**

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Conservation des aliments par les additifs de conservation.....</b> | <b>56</b> |
| 1.1. Définition .....                                                     | 56        |
| 1.2. Conditions d'addition des additifs conservateurs .....               | 56        |
| 1.3. Quels sont les additifs de conservation ? .....                      | 56        |

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.3.1. Les additifs antimicrobiens .....                             | 56        |
| 1.3.2. Les additifs antioxydants .....                               | 58        |
| <b>2. Conservation des aliments sous atmosphère protectrice.....</b> | <b>58</b> |
| 2.1. Définition .....                                                | 58        |
| 2.2. Principe de la technique .....                                  | 58        |
| 2.3. Gaz utilisés .....                                              | 59        |
| 2.3.5. Mélange des gaz utilisés .....                                | 60        |
| 2.4. Conservation des aliments respirant .....                       | 61        |
| 2.5. Conservation des aliments non-respirant .....                   | 61        |
| 2.6. Application de l'atmosphère modifiée .....                      | 61        |
| 2.7. Avantages de la technique .....                                 | 62        |
| <b>3. Conservation des aliments par les hautes pressions.....</b>    | <b>62</b> |
| 3.1. Définition et objectifs .....                                   | 62        |
| 3.2. Principe de la technique .....                                  | 63        |
| 3.3. Types d'aliments traités par pascalisation .....                | 63        |
| 3.4. Effet de la pascalisation .....                                 | 63        |
| 3.4.1. Sur les constituants alimentaires .....                       | 63        |
| 3.4.2. Sur les enzymes .....                                         | 63        |

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 3.4.3. Sur les microorganismes .....          | 64 |
| 3.5. Techniques de la pascalisation .....     | 65 |
| 3.5.1. Système de compression directe .....   | 65 |
| 3.5.2. Système de compression indirecte ..... | 66 |
| 3.6. Composition de l'équipement .....        | 66 |
| 3.7. Avantages de la pascalisation .....      | 66 |
| 4. Conservation par fermentation .....        | 66 |
| 4.1. Types de fermentation .....              | 66 |
| 4.1.1 Fermentation lactique .....             | 67 |
| 4.1.2. Fermentation alcoolique .....          | 68 |
| <b>Références bibliographiques</b> .....      | 69 |

# **I. NOTIONS PRELIMINAIRES**

## **1. Définition d'un aliment**

Un aliment est une matière d'origine agricole ou industrielle apportant au consommateur des nutriments nécessaires à la couverture de ses besoins (couverture partielle pour un aliment donné, l'ensemble des besoins étant satisfait pour la consommation d'un ensemble varié d'aliments). Il doit être appétant et dépourvu de toxicité. On peut distinguer l'aliment à l'état brut ou le produit alimentaire élaboré.

## **2. Qualité d'un aliment**

L'objectif principal de la conservation des aliments est de préserver leur qualité. La qualité des matières premières et des aliments est définie par les contraintes des transformateurs, les besoins des consommateurs et les exigences réglementaires. Les composantes de la qualité sont multiples. Les principales sont :

### **2.1. Qualité nutritionnelle**

La valeur nutritionnelle d'un aliment est déterminée par la quantité et la qualité de ses nutriments:

- Teneur en protéines, lipides, glucides vitamines, minéraux ;
- Qualité des nutriments : valeur biologique des protéines, nature des acides gras, des acides aminés et des glucides, disponibilité des nutriments.

La valeur nutritionnelle est également déterminée par la valeur énergétique de l'aliment.

### **2.2. Qualité hygiénique**

La qualité hygiénique d'un aliment est caractérisée par deux aspects :

- Qualité microbiologique : l'aliment doit être dépourvu de toute sorte de microorganismes pathogène ou toxigènes.
- Qualité toxicologique : l'aliment ne doit pas contenir des substances anti-nutritives, des contaminants,...

### 2.3. Qualité organoleptique

Les qualités organoleptiques conditionnent l'appétence et le plaisir que procure la consommation du produit; elles intègrent la couleur, la texture, l'odeur, la saveur et l'arôme. A ces critères principaux peuvent être ajoutés ceux qui déterminent le choix de l'aliment à l'achat :

- valeur socio-affective,
- coût,
- facilité d'emploi,
- stabilité dans le temps,
- etc.

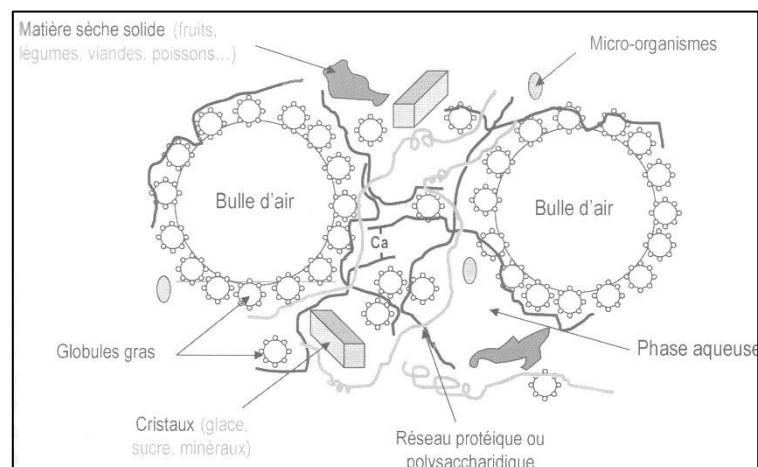
### 2.4. Qualité technologique

Les matières premières et les produits intermédiaires destinés à l'élaboration des aliments doivent présenter toutes les qualités requises pour leur transformation, que ce soit en matière de faisabilité technologique ou en matière de rendement de transformation qui conditionne le coût de revient.

## 3. Altérations des aliments

Les produits alimentaires peuvent subir des réactions d'altération diverses durant toutes les étapes impliquées dans leur production à partir du champ jusqu'au consommateur. Elles dépendent essentiellement de la nature et l'état de l'aliment (frais ou transformé), ainsi que des conditions de récolte, de manutention, de transformation, de conditionnement, de stockage et de commercialisation de l'aliment.

La complexité et l'hétérogénéité de l'aliment font que celui-ci soit un système instable de point de vue thermodynamique, chimique et biologique (figure 1).



## **Figure 1 Structure matricielle des aliments**

Les altérations des aliments peuvent être dues à des microorganismes, à des réactions chimiques ou à des réactions enzymatiques (ou biochimiques).

### **3.1. Altérations microbiennes**

Beaucoup d'aliments constituent un excellent milieu de culture pour les microorganismes qui vivent aux dépens des divers constituants organiques des aliments, à condition que le milieu soit favorable. Les altérations microbiennes sont souvent consécutives à d'autres altérations telles que : altérations mécaniques (dus aux rongeurs, aux insectes), humidifications des aliments, etc.

#### **3.1.1. Facteurs de développement microbien**

La croissance des microorganismes dépend de plusieurs facteurs :

- La nature du produit : animale, végétal, légume, ...etc.
- L'état du produit (cuit, frais, sec, ... etc.
- Potentiel redox : bactéries aérobies ou anaérobies.
- Le pH du produit
- L'activité de l'eau : plus ce paramètre est faible, plus le développement bactérien est limité
- La température : c'est le facteur le plus important. La zone dangereuse du développement des pathogènes est -3 à 65°C.

#### **3.1.2. Classification des bactéries selon la température**

Pour rappel, les bactéries peuvent être classées, selon leur température de développement en

- Psychrophile : -9 - 30°C, l'optimal est 5-20°C, exemple : Yersinia, Pseudomonas ;
- Mésophile : 10 - 45°C, l'optimal est 20-40°C, exemple : C. botulinum, S. aureus ;
- Thermophile : 25-90 °C, l'optimal est 70-80°C, exemple : Lactobacillus

### **3.2. Altérations enzymatiques**

#### **3.2.1. Brunissement enzymatique (BE)**

Le BE est l'oxydation enzymatique des composés phénoliques en substances (polymères) colorés, le plus souvent bruns ou noirs. Les enzymes responsables sont appelées polyphenoloxydases.

de nombreux substrats phénoliques se trouvent dans les aliments tels que les fruits et les légumes. Sous l'action des enzymes polyphénoloxydase et peroxydases, et en présence d'oxygène, ces composés phénoliques s'oxydent facilement en quinones. Les quinones formées s'oxydent à leur tour, sans faire appel à des enzymes particulières, et se polymérisent en donnant des composés bruns qui sont responsables du brunissement superficiel ou profond apparaissant en diverses circonstances (épluchage, découpage, broyage, etc.). Les organes végétaux ne brunissent que si leurs tissus sont blessés ou si leur métabolisme est profondément perturbé. En effet, dans les cellules saines, les composés phénoliques sont localisés dans la vacuole alors que les enzymes d'oxydation sont localisés dans le cytoplasme. La membrane qui sépare la vacuole du cytoplasme empêche tout contact entre les enzymes et leurs substrats : l'oxydation de ces substrats n'a donc pas lieu. En revanche, quand les cellules sont blessées, tous leurs constituants se trouvent mélangés.

Le contrôle ou prévention du brunissement enzymatique peut être réalisé de trois façons. La première repose sur l'inhibition des enzymes polyphénoloxydases, la deuxième repose sur le piégeage des quinones et la troisième repose sur la limitation de la disponibilité de l'oxygène.

### **3.2.2. Hydrolyse des lipides des glucides**

Les lipides sont hydrolysés principalement les lipases qui hydrolysent les liaisons esters des glycérides et libèrent à partir des triglycérides des acides gras, des diglycérides et des monoglycérides. Les lipases restent actives même à une température de stockage de -18°C bien que la cinétique de formation des acides gras libres soit ralentie. C'est pourquoi l'hydrolyse enzymatique des lipides constitue la réaction principale d'altération des aliments frais au cours de leur stockage à l'état congelé.

Les hydrolases qui posent des problèmes dans le cas des aliments d'origine végétale sont les enzymes pectiques et les amylases. Les amylases hydrolysent l'amidon de certains aliments en sucres réducteurs. C'est le cas de la pomme de terre stockée à des températures inférieures à 5°C. Cette pomme de terre ne se prêtera pas bien à la friture. Les pectinases dégradent les parois cellulaires des fruits et légumes et entraînent, donc, un ramollissement de ces parois.

### **3.3. Altérations chimiques**

Les principales altérations chimiques des aliments sont le brunissement non enzymatique et l'oxydation des lipides.

#### **3.3.1. Brunissement non enzymatique (BNE)**

Le BNE est souvent associé à la réaction de Maillard, toutefois, un certain nombre d'autres réactions chimiques n'obéissant pas à la définition de la réaction de Maillard participent aussi au brunissement non

enzymatique. C'est le cas de la caramélisation, de l'oxydation chimiques des phénols ou des réactions chimiques intervenant au cours de la madérisation.

La réaction de Maillard est l'ensemble des interactions résultant de la réaction initiale entre un sucre réducteur et un groupement aminé (acides aminé, peptide, protéine). Elle a lieu lors du stockage des aliments ou plus fréquemment lors de leur exposition à des traitements thermiques. Elle peut aussi donner naissance à des composés cancérigènes et également réduire la valeur nutritionnelle des aliments en dégradant des acides aminés essentiels. In vivo, elle intervient dans les processus de dégradation du collagène.

La caramélisation se produit lors du chauffage d'un sucre au-delà de son point de fusion (environ 200°C pour le saccharose) en absence de composés azotés. La réaction peut être catalysée par l'ajout d'un acide comme l'acide citrique ou l'acide acétique. Les produits formés au cours de la réaction confèrent au caramel la couleur, l'arôme et le goût caractéristique du produit.

### **3.3.2. Oxydation des lipides**

Les principaux facteurs déterminant la durée de vie des lipides sont les réactions d'oxydation. Les substrats de ces réactions sont principalement les acides gras insaturés. Ils s'oxydent en général plus vite lorsqu'ils sont libres et plus insaturés. Les acides gras saturés ne s'oxydent qu'à une température supérieure à 60°C, tandis que les acides polyinsaturés s'oxydent même lors de l'entreposage des aliments à l'état congelé.

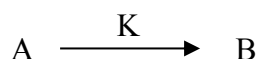
Les principaux problèmes posés par l'oxydation des lipides résident dans la dégradation des propriétés biochimiques, organoleptiques (formation de composés volatils d'odeur désagréable : rancissement) et nutritionnelles (par interaction des produits d'oxydation avec les acides aminés) de l'aliment. L'oxydation des lipides conduit également à la formation des peroxydes qui sont des molécules cancérigènes.

## **4. Cinétique de réaction et paramètres de prédiction de la durée de vie des aliments**

La destruction des microorganismes, l'inactivation enzymatique et les réactions chimiques (dénaturation des protéines, altération des vitamines, etc.) peuvent être décrites en termes de cinétiques de réaction.

### **4.1. Vitesse de réaction**

La vitesse de réaction est le changement de la concentration des constituants de l'aliment en fonction du temps. La réaction suivante représente la détérioration d'un composé A qui se transforme en un composé B :





K : constante de vitesse de la réaction.

La vitesse de réaction  $v$ , est représentée par la disparition du réactif A ou la production du composé B en fonction du temps,  $t$  :

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = +\frac{d[B]}{dt} \quad (1)$$

$d[A]$  : variation de la concentration du réactif A ;

$d[B]$  : variation de la concentration du réactif B ;

$dt$  : laps de temps écoulé.

#### 4.2. Ordre de réaction

A une température donnée, l'évolution de la concentration peut être donnée par le modèle cinétique chimique :

$$v = \frac{dC}{dt} = \pm KC^n \quad (2)$$

$dC$  : variation de concentration d'un composé (A ou B) participant à la réaction (en mol/L)

$dt$  : laps de temps (en s) ;

$dC/dt$  : la vitesse de la réaction, ou le changement de la concentration de A ou de B en fonction du temps ;

K : la constante de la réaction dont les unités dépendent de l'ordre de la réaction ;

$n$  : l'ordre de la réaction (0, 1, 2, etc.) (Nombre sans dimension).

Dans ce qui suit, seules les deux types de réaction d'ordre zéro et d'ordre un qui seront détaillées, c'est les types de réactions les plus souvent rencontrées.

##### 4.2.1. Réaction d'ordre zéro

Dans ce cas, la vitesse de la réaction est indépendante de la concentration du composé :

$$\frac{dC}{dt} = \pm KC^0 = K \quad (\text{Car } C^0=1) \quad (3)$$

Par intégration de l'équation  $C_0$  et  $C$ , on obtient :

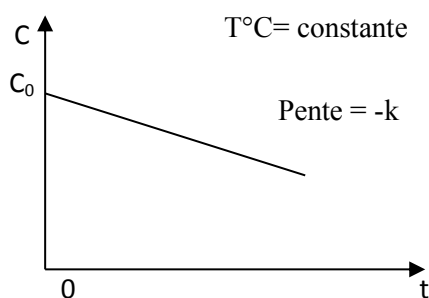
$$\int_{C_0}^C dc = \pm K \int_0^t dt$$

$$[C]_{C_0}^C = \pm K [t]_0^t$$

Ce qui donne en final :

$$C = C_0 \pm kt \quad (4)$$

Cette équation indique que la concentration du composé est liée au temps par une relation linéaire. La pente de la droite est égale à la constante de la réaction ( $K$ ) ; l'ordonnée à l'origine de la droite est  $C_0$  qui correspond à la concentration initiale du composé, comme illustré à la figure 2 et qui est donnée pour une pente négative.



**Figure 2** Représentation graphique d'une réaction d'ordre zéro.

#### 4.2.2. Réaction d'ordre un

Dans le cas de la réaction d'ordre un, la vitesse de réaction varie proportionnellement avec la concentration du composé :

$$\frac{dC}{dt} = \pm KC^1 = \pm KC \quad (5)$$

Par intégration de l'équation, on obtient :

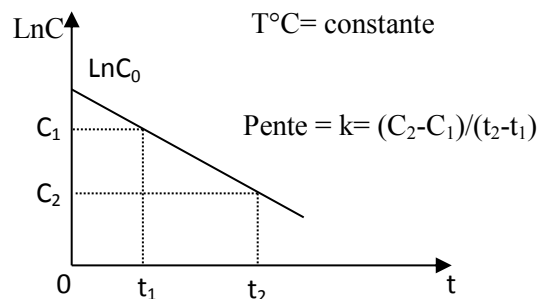
$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \pm K \int_0^t dt$$

$$[\text{Ln}C]_{C_0}^C = \pm K [t]_0^t$$

$$\text{Ln}C = \pm Kt + \text{Ln}C_0$$

$$\text{Ln} \frac{C}{C_0} = Kt \quad (6)$$

Ceci indique qu'il y a une relation linéaire entre le logarithme népérien de la concentration et le temps (figure 3).



**Figure 3** Représentation graphique d'une réaction d'ordre un.

### 4.3. Effet de la température sur la vitesse de réaction

#### 4.3.1. Energie d'activation et loi d'Arrhenius

L'énergie d'activation ( $E_a$ ) est la quantité d'énergie nécessaire pour initier une réaction chimique. En effet, pour démarrer une réaction, on doit souvent faire face à une barrière énergétique, c'est-à-dire apporter un minimum d'énergie pour qu'elle débute.

L'énergie d'activation peut être déterminée expérimentalement en se basant sur la loi d'Arrhenius. Cette loi montre qu'il y a une relation logarithmique entre la constante de réaction,  $k$ , et l'inverse de la température ( $1/T$ ) en degré Kelvin :

$$\text{Ln}k = \left( \frac{-E_a}{RT} \right) + \text{Ln}B \quad (7)$$

Ou également :

$$\text{Log}k = \left( \frac{-E_a}{2,3RT} \right) + \text{Log}B \quad (7')$$

B : constate d'intégration

T :température en °K

R : constante de réaction égale à 8,314J/mol.K°

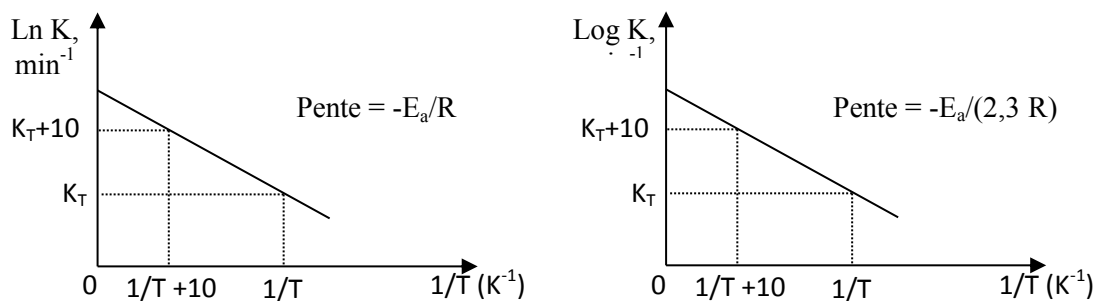
La figure 4 montre la relation linéaire entre la constante de réaction et l'inverse de la température sur une échelle semi-logarithmique. L'énergie d'activation  $E_a$  est déduite à partir de la pente d'une droite.

La pente est :

$$\frac{E_a}{R} = \frac{\text{Ln}k_2 - \text{Ln}k_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$$

Ou également :

$$\frac{E_a}{2,3R} = \frac{\text{Log}k_2 - \text{Log}k_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$$



**Figure 4** Détermination graphique de l' $E_a$ .

#### 4.4. Le concept de la valeur $Q_{10}$

La valeur  $Q_{10}$  est le rapport entre la vitesse à une température  $T+10^{\circ}\text{C}$  et une température  $T$  :

$$Q_{10} = \left( \frac{v_{T+10^{\circ}\text{C}}}{v_T} \right) \quad (8)$$

$V_T$  : vitesse à une température donnée ( $T$ ) ;  $V_{T+10}$  : vitesse du changement de qualité à  $T+10^{\circ}\text{C}$ .

La valeur  $Q_{10}$  permet donc de mesurer la sensibilité des aliments face aux changements de température. Elle peut aussi être définie par la relation suivante :

$$Q_{10} = \frac{K_{T+10}}{K_T} = \frac{t_T}{t_{T+10}} \quad (9)$$

$K_T$  : la constante de réaction à  $T$  ;  $K_{T+10}$  : la constante de réaction à  $T+10^{\circ}\text{C}$  ;  $t_T$  : le temps ou la durée de vie à  $T$  ;  $t_{T+10}$  : le temps ou la durée de vie à  $T+10^{\circ}\text{C}$ .

$Q_{10}$  est une constante qui montre à quel point la vitesse d'une réaction augmente lorsque la température est élevée de  $10^{\circ}\text{C}$ . En général, plus la valeur de  $Q_{10}$  est élevée, plus l'aliment est sensible à la température.

La relation générale de  $Q_{10}$  (Eq 9) peut aussi s'exprimer par la relation suivante :

$$\frac{t_1}{t_2} = Q_{10}^{\left( \frac{T_2 - T_1}{10} \right)} \quad (10)$$

### 5. Propriétés thermodynamique des aliments

#### a- La chaleur

##### - La chaleur massique ( $C_p$ )

- C'est la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer, d'une unité de température ( $1^{\circ}\text{C}$  ou  $^{\circ}\text{K}$ ), un kg d'un produit sans changement d'état. Elle est définie pour les produits non congelés et ceux congelés.

##### - *Produit non congelé*

La chaleur massique dans le cas où le produit est non congelé est :

$$Cp^+ = 2,09 F + 1,26 ST + 4,18 W$$

F : Pourcentage de gras ; ST : Pourcentage des solides totaux ; W : Pourcentage d'eau ;

$Cp^+$  : est exprimée en KJ/kg.°C.

Avec :  $F+ST+W=1$

#### **- Produit congelés**

Pour le produit congelé, la chaleur massique est définie par la relation suivante:

$$Cp^- = 2,09 (F + G) + 1,26 ST + 4,18 E$$

G : pourcentage de glace ; E : pourcentage d'eau non congelée

$$\text{Avec : } E+G=W$$

#### **b- La masse volumique ( $\rho$ )**

Elle est définie par la masse d'un volume d'une matière à une température donnée.

-Si on connaît la teneur en eau :

$$\rho = 890 + 110 W$$

-Si on connaît la composition de l'aliment, deux cas sont à distinguer :

Au-dessus du point de congélation de l'aliment :

$$1/\rho = (W/1000) + (F/930) + (C/1550) + (P/13380)$$

C : pourcentage d'hydrates de carbone ; P : pourcentage de protéines.

En dessous du point de congélation de l'aliment :

$$1/\rho = (E/1000) + (F/930) + (C/1550) + (P/13380) + G/920$$

#### **C- La conductivité thermique (K)**

Elle est le flux de chaleur, par m<sup>2</sup> traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de 1°C entre les deux faces. Elle est exprimée par W/m.°C.

#### d- La diffusivité thermique ( $\alpha$ )

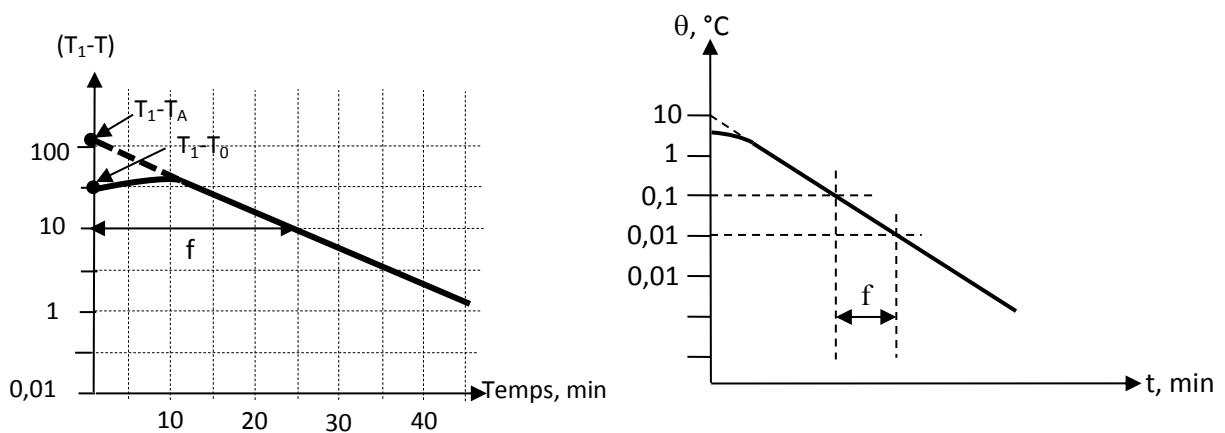
La diffusivité thermique caractérise la vitesse à laquelle se propage la chaleur, par conduction, dans un corps et elle est définie par la relation suivante :

$$\alpha = K / (C_p \cdot \rho)$$

#### 6. Cinétique de variation de la température dans l'aliment

Lors du chauffage ou du refroidissement d'un produit alimentaire dont la température initiale est  $T_0$  placé dans un milieu chauffant ou refroidissant dont la température est  $T_1$ , la température  $T_0$  n'atteindra jamais la température  $T_1$  et une différence persiste toujours. En coordonnée semi-logarithmique, la relation reliant  $\theta$  au temps  $t$  est linéaire comme le montre la figure 7, tel que :

$$\theta = (T_1 - T) / (T_1 - T_0)$$



**Figure 7.** Courbe de pénétration de la chaleur dans un aliment.

$\theta$  : Changement de température qui reste à faire dans l'aliment.

Le temps de chauffage ou de refroidissement est défini par la relation suivante :

$$t = f \cdot \log \left[ j \left( \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T} \right) \right] ; f : \text{cycle logarithmique en minute ;}$$

$j = (T_1 - T_A) / (T_1 - T_0)$  ; Le rapport 'j' exprime le retard de la droite par rapport à l'ordonnée  $T_0$ .

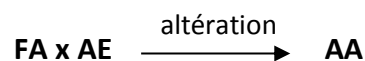
$$\text{ou } t = f \cdot \log \left( j \frac{1}{\theta} \right)$$

## II. STABILISATION DES ALIMENTS

Dans cette partie seront présentées les techniques de conservation les plus utilisées pour stabiliser les aliments, particulièrement celles employées dans la stabilité enzymatique et biologique. Avant de passer en revue les techniques de conservation des aliments, il a été préféré de rappeler des principaux objectifs et du principe de la stabilisation des produits alimentaires.

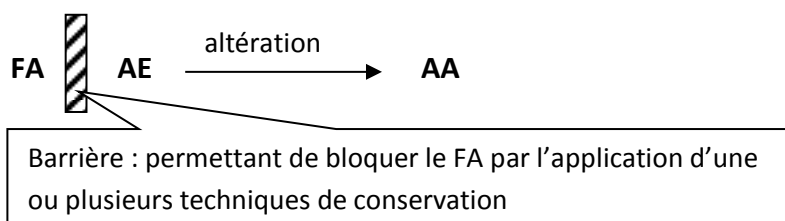
### 1. Principe de la conservation

Quelles que soient les altérations subies, un certain nombre de facteurs interviennent : température, activité de l'eau, potentiel redox, pH, notamment. Facteurs auxquels, il faut ajouter la nature du produit, la présence d'inhibiteurs de croissance, etc... Les techniques de conservation sont basées sur le blocage de l'un ou de plusieurs de ces paramètres.



FA : facteur d'altération ; AE : aliment en bon état ; AA : aliment altéré.

Pour éviter l'altération, on doit bloquer le facteur causant l'altération



Le tableau 1 décrit sommairement les techniques de conservation en les mettant en regard des divers types d'altération et de leurs facteurs de développement.



**Tableau 1 :** Altérations des aliments, leurs facteurs de développement et techniques de conservation.

| <b>Altérations</b>    | <b>Paramètres de développement</b>                                                                                                                                       | <b>Moyens de conservation</b>                                                                                                                                                 |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Microorganismes       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Température</li> <li>- <math>a_w</math></li> <li>- Potentiel redox</li> <li>- pH</li> <li>- Inhibiteur de croissance</li> </ul> | Cuisson – Appertisation - Réfrigération- Surgélation/congélation – Salaison – sucrage – déshydratation – fumaison – atmosphère modifiée – fermentation – nitrates - vinaigre. |
| Enzymes               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Température</li> <li>- <math>a_w</math></li> <li>- Potentiel redox</li> <li>- pH</li> </ul>                                     | Appertisation-Réfrigération – Salaison – sucrage – déshydratation – fumaison – atmosphère modifiée – blanchiment – nitrates - vinaigre.                                       |
| Altérations chimiques | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Température</li> <li>- <math>a_w</math></li> <li>- Potentiel redox</li> <li>- Lumière</li> </ul>                                | Appertisation–Réfrigération- Surgélation/congélation – Salaison – sucrage – déshydratation – atmosphère modifiée – Conservation à l’abri de la lumière (emballage opaque).    |

## 2. Objectif principal de la conservation

L’objectif principal de la conservation des aliments est de prolonger leur durée de vie par principalement l’inactivation enzymatique et la destruction microbienne. La durée de vie, dite également période de garde ou durabilité est déterminée par l’ensemble de changements intrinsèques (transformations physicochimiques) ayant lieu dans l’aliment.

Deux notions importantes à mentionner :

- Date limite de consommation (DLC) : « à consommer avant... ». S’applique pour les produits frais et indique que la toxicité microbiologique est possible à partir de la date indiquée.
- Date d’utilisation optimale (DLUO) : « à consommer de préférence avant... ». Indique une date à partir de laquelle la qualité de l’aliment peut être en de ça du niveau attendu.

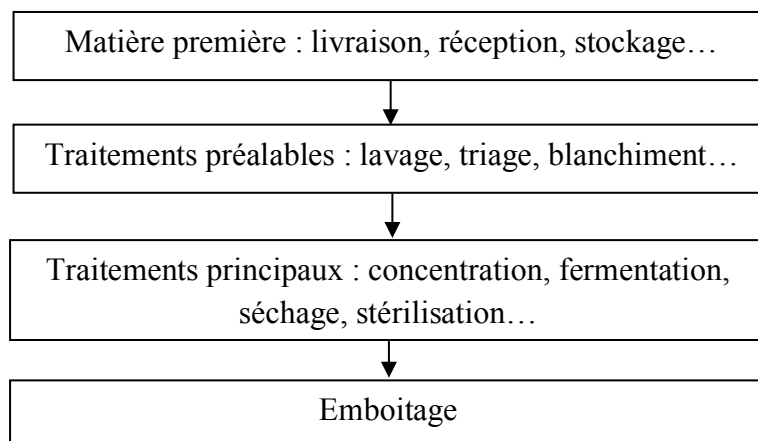
### 3. Techniques de conservation des aliments

Les techniques de conservation des aliments peuvent être classées en trois groupes : physique, physico-chimique ou microbiologique. Le premier groupe de ces techniques fait appel à des procédés physiques comme la température, la pression, l'irradiation ionisante et le champ électrique. Le deuxième groupe se base sur la modification des caractéristiques intrinsèque de l'aliment comme le pH, l'activité de l'eau ou l'incorporation d'additifs dans l'aliment en vue de sa conservation. Le dernier groupe repose sur l'utilisation des microorganismes pour la modification des caractéristiques physico-chimiques de l'aliment ; la technique la plus connue est la fermentation.

La combinaison de plusieurs techniques de conservation peut être également envisagée afin d'augmenter la durée de vie d'un aliment sans provoquer une modification significative de ses caractéristiques sensorielles et nutritives.

## II.1. Traitements préalables

Tout processus de conservation alimentaire peut être schématisé comme suit :



**Remarque :** dans certain cas tel que la stérilisation, le traitement principal est effectué après emboitage.

**1. Lavage :** c'est la première opération technologique, mais il peut venir après triage lorsque le produit est embourbé de terre et d'autres étrangers (feuilles, sables, branches...). Le lavage permet de nettoyer le produit et d'éliminer plus de 90% de la microflore de surface.

**2. Broyage :** (ou trituration) de la matière première. Il permet de :

- Lui donner une forme donnée,
- Mieux utiliser le volume de l'emballage,
- De faciliter le processus technologique (évaporation, pressage....).

### **3. Blanchiment**

Le blanchiment est un prétraitement de conservation qui consiste à chauffer brièvement des légumes ou certains fruits à jusqu'à une certaine température, puis à les refroidir avant de leur faire subir d'autres traitements tels que la stérilisation, la congélation ou le séchage.

#### **3.1. Objectifs du blanchiment**

Bien que les objectifs du blanchiment soient variables, toutefois le traitement est souvent appliqué dans le but d'inactiver les enzymes.

❖ **Inactivation des enzymes :** Dans le cas des fruits et légumes, le blanchiment vise à inactiver les enzymes du tissu végétal et les enzymes microbiennes qui peuvent agir même lorsque les microorganismes ne peuvent plus se multiplier (par ex. lors de la congélation). Les enzymes du tissu végétal comme la catalase et la peroxydase peuvent provoquer des altérations de la couleur et de l'arôme par l'oxydation. D'autres enzymes provoquent la formation d'odeur et de saveur indésirables par hydrolyse (enzymes hydrolytiques), tels que la lipase (formation d'acides gras libres, goût rance), les protéases (formation des peptides amères), les amylases (formation des sucres simples), etc. La couleur peut être modifiée par un groupe très important d'enzymes. La polyphénoloxydase entraîne le brunissement enzymatique, la chlorophyllase détruit la chlorophylle, la lipoxydase détruit le carotène, etc.

#### ❖ **Autres fonctions du blanchiment**

- Diminution du nombre de microorganismes à la surface du produit ;
- Assouplissement des tissus végétaux et réduction de leur volume, ce qui facilite leur remplissage ;
- Il rend la couleur plus attrayante pour le consommateur ;

- Elimination de l'air et des gaz intercellulaires ;
- Le blanchiment à l'eau permet d'éliminer (lavage à chaud) une partie de substances indésirables (par diffusion) : nitrites, nitrates, oxalates solubles, résidus de pesticides, etc.
- Préservation de la couleur par l'inactivation des enzymes ;
- Uniformisation de la couleur des frites (pomme de terre) par l'ajustement de la teneur en glucose.

### **3.2. Détermination l'efficacité du blanchiment**

L'efficacité du blanchiment est évaluée par la mesure de l'activité de la peroxydase résiduelle. Le choix de ces enzymes vient du fait qu'elles sont les plus résistantes à la chaleur. Si celles-ci sont détruites lors du blanchiment, cela signifie que les autres enzymes ont été aussi détruites.

### **3.3. Inconvénients du blanchiment**

Bien que le blanchiment soit nécessaire, il présente un certain nombre d'inconvénients :

- Perte importante d'éléments nutritifs par destruction des composés thermolabiles (sensibles à la chaleur) : 10-50% de la vitamine C et 5-20% de la chlorophylle ;
- Perte de substances solubles par lessivage (cas de blanchiment à eau), tels que les minéraux, les sucres, les protéines et les vitamines solubles.
- Le blanchiment à l'eau est une source de polluants.

### **3.4. Procédés de blanchiment**

Le blanchiment peut se faire par immersion des produits dans de l'eau chaude ou par passage dans la vapeur d'eau. Les blanchiments à eau sont les plus simples et les plus répandus dans l'industrie alimentaire, toutefois ils présentent l'inconvénient de générer des effluents volumineux dommageables pour l'environnement. Les blanchiments à vapeur sont moins polluants, car les composés solubles du produit alimentaire ne sont pas extraits par lessivage. De plus, le volume d'effluents est cinq fois supérieur à celui contenu dans l'eau. En contrepartie, l'efficacité énergétique des blanchiments à eau est nettement supérieure (50-60%) à celle des blanchiments à vapeur (10-20%).

### 3.5. Durée et température de blanchiment

Puisque le blanchiment est fait principalement dans le but de détruire les enzymes, il doit être effectué à une température et une durée de temps qui détruira l'enzyme la plus résistante à la chaleur (peroxydase). En général, la température de blanchiment est comprise entre 85 et 100°C et la durée varie de 1 à 10 min, dix minutes étant une valeur exceptionnelle s'appliquant à des produits dont les dimensions sont nettement au-dessus de la moyenne (maïs, p.ex.). Ainsi, la plupart des légumes sont blanchis en 2 à 3 min à 100°C, le temps augmente avec l'épaisseur ou le diamètre du produit.

Pour établir la durée d'un traitement thermique, il est nécessaire de calculer particulièrement la fraction du changement ( $\theta$ ) qui reste à faire dans l'aliment selon l'équation suivante:

$$\theta = \frac{T_f - T}{T_f - T_0} \quad (3)$$

$T_0$  : température initiale de l'aliment (en °C) ;  $T$  : température de l'aliment après un certain temps au contact du fluide.

Le temps (en s) de blanchiment (pour atteindre la température  $T$ ) peut être donné par l'équation suivante :

$$t = t' \log \left[ j \frac{(T_f - T_0)}{T_f - T} \right] = f \log \left( j \frac{1}{\theta} \right) \quad (4)$$

$t'$  : temps pour traverser un cycle logarithmique (en s) ;  $j$  : ordonnée à l'origine de la prolongation de la droite du temps  $t$  (voir aussi paragraphe I.6).

## **II.2. Traitements thermiques : pasteurisation et stérilisation des aliments**

### **1. Définition et objectifs**

La pasteurisation est un traitement thermique qui se fait à une température inférieure à 100 °C et ne vise à détruire que les bactéries pathogènes sous forme végétative (ex. salmonelles). La pasteurisation s'applique :

- Lorsqu'on veut détruire les cellules végétatives des microorganismes pathogènes tels que les bacilles de la tuberculose et les salmonelles pour le lait, les salmonelles dans les œufs liquides, etc.
- Lorsque la qualité organoleptique serait affectée par une stérilisation.

Les aliments pasteurisés doivent être emballés dans un contenu hermétiquement clos. Ils doivent être toujours être réfrigérés après la pasteurisation sauf dans le cas des aliments dont le pH est suffisamment bas ou l'activité de l'eau est suffisamment basse.

La stérilisation est un traitement thermique qui se fait à une température supérieure à 100 °C. Le but principal de la stérilisation est la destruction des microorganismes pouvant se développer lors de l'entreposage. En outre, la stérilisation doit :

- Détruire les enzymes qui nuisent à la dégradation des aliments si le produit n'a pas été blanchi,
- Assurer une cuisson suffisante de l'aliment lorsque c'est nécessaire,
- Minimiser les effets de la chaleur sur les, les nutriments, la couleur et les qualités organoleptiques de l'aliment

La stérilisation a pour effet de prolonger la durée de vie des aliments pour au moins six mois.

### **2. Procédés du traitement thermique**

Pour le traitement des aliments liquides, on utilise souvent des échangeurs tubulaires ou à plaques. Le remplissage des contenants s'effectue après le traitement thermique comme la pasteurisation du lait de consommation.

Pour les aliments en conserves, semi-liquides ou liquides emballés, on utilise des autoclaves pour effectuer la stérilisation. Deux types d'autoclaves peuvent être rencontrés : autoclaves discontinus ou autoclaves continus.

### **3. Paramètres du traitement thermique**

Les paramètres essentiels de la pasteurisation et la stérilisation sont la température (T) et le temps (t). C'est ces éléments qui définissent ce que l'on appelle 'barème de traitement'.

#### **3.1. Choix de la température**

Les microorganismes sont sensibles au pH du milieu. Ce dernier est le facteur essentiel qui guide le choix de la température :

-si le  $\text{pH} \leq 4,2$  (aliments acide) : la température appliquée sera supérieure à  $100^{\circ}\text{C}$  (= pasteurisation). Exemple : conserves des fruits.

-si le  $\text{pH} > 4,2$  (aliments peu acides) : la température appliquée sera inférieure à  $100^{\circ}\text{C}$  (= stérilisation). Exemple : viandes, poissons, légumes...

##### ***Pourquoi 4,2 ?***

La limite 4,2 est prise par rapport aux agents responsables du botulisme (*Clostridium botulinum*) qui ne se développent pas à un pH inférieur à 4,2.

##### ***Pourquoi ces agents ?***

Ces agents sont choisis par le fait qu'ils sont dangereux pour la santé humaine en produisant une toxine dont l'action dépasse 1000 fois celle de l'acide cyanhydrique et qui est thermorésistante (peut prendre plusieurs heures en  $100^{\circ}\text{C}$ ). Ce qui nécessite une application d'une température de stérilisation ( $T \geq 100^{\circ}\text{C}$ ).

Dans le cas où le milieu est peu acide l'application d'une pasteurisation est souvent suffisante (on s'intéresse dans ce cas qu'à la destruction des microorganismes pathogène et la réduction de la charge microbienne).

#### **3.2. Choix de la durée du traitement**

La durée de stérilisation ou de la pasteurisation dépend essentiellement de :

- l'espèce et le nombre des microorganismes présents dans l'aliment ;

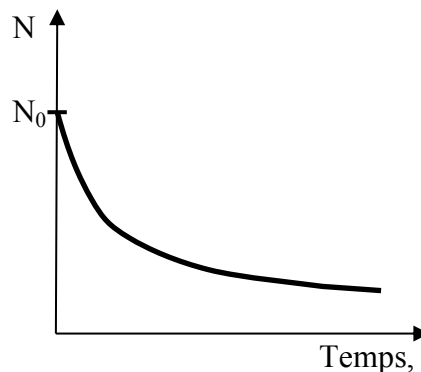
- la température du traitement

### 3.2.1. Destruction des microorganismes

La destruction des microorganismes suit une loi cinétique d'ordre un :

$$\frac{dN}{dt} = -KN \quad (1)$$

K : constante de vitesse de destruction microbienne ; t : temps nécessaire pour ramener le nombre de microorganismes d'un nombre initial ( $N_0$ ) à un nombre final (N). La figure 1 présente la destruction des microorganismes en fonction du temps.



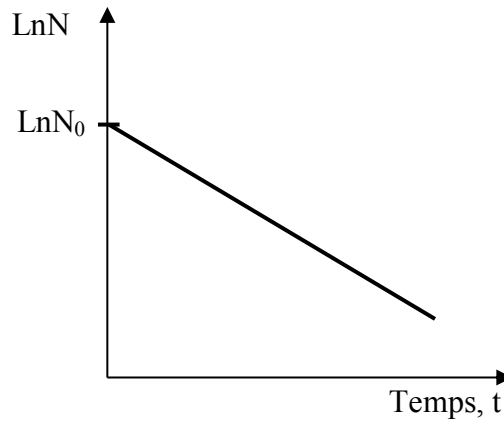
**Figure 1** Réduction des bactéries par la chaleur

L'intégration de l'équation (1) donne :

$$\ln N = -Kt + \ln N_0 \quad (2)$$

C'est une équation d'une droite dont l'origine est  $\ln N_0$  et la pente est  $-K$  (figure 2). La courbe ainsi obtenue est appelée « courbe de survie des microorganismes ».



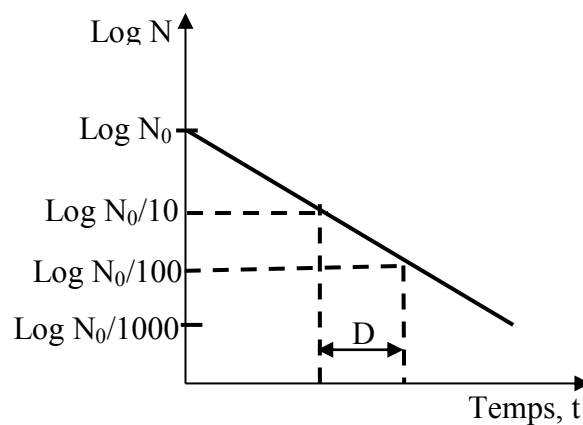


**Figure 2** Courbe de survie des microorganismes.

Ou également :

$$\text{Log}N = -\frac{K}{2,303}t + \text{Log}N_0 \quad (3)$$

En retraçant la courbe  $\text{Log}N$  en fonction du  $t$ , on aura une droite dont la pente dans ce cas est  $-K/2,303$  (Figure 3).



**Figure 3** Courbe de survie des microorganismes

$D$  : temps de réduction décimale des microorganismes.

D'après la courbe, la pente est égale à :  $-1/D$ . ( $D$  étant le temps de réduction décimale ou c'est le temps nécessaire pour réduire 10 fois le nombre initial de microorganismes ou également c'est le temps nécessaire pour tuer 90% le nombre initial).

D'après l'équation (2), la pente est égale à  $-K/2,303$ . Ceci permet de déduire que :

$$D = \frac{2,303}{K}$$

De ce fait :

$$\text{Log} \frac{N}{N_0} = -\frac{1}{D}t \Rightarrow \text{Log} \frac{N_0}{N} = \frac{t}{D}$$

Pour un rapport de :

$$\frac{N_0}{N} = 10 \Rightarrow t = D$$

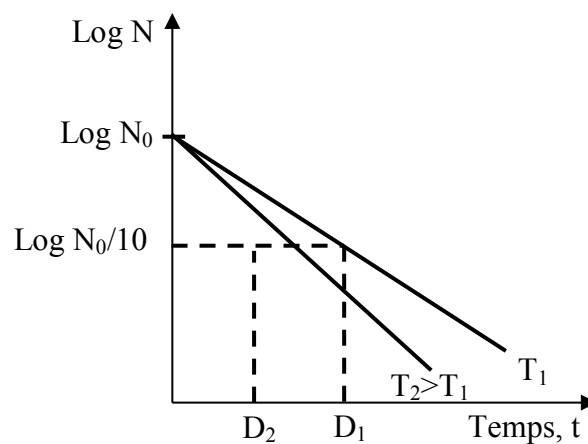
$$\frac{N_0}{N} = 10^2 \Rightarrow t = 2D$$

$$\frac{N_0}{N} = 10^3 \Rightarrow t = 3D$$

$$\frac{N_0}{N} = 10^n \Rightarrow t = nD ; 'n' \text{ étant le nombre de réduction décimale. 'D' dépend de la}$$

température appliquée et l'espèce microbienne. Il exprime la sensibilité du microorganisme à la destruction.

Que devient D si on change la température ? La courbe de la figure 3 le met en exergue, pour une souche bactérienne donnée.



**Figure 4** Effet de la température de chauffage sur la valeur D, pour une souche bactérienne donnée.

On voit que plus la température augmente, plus la durée de chauffage peut être courte, et réciproquement, plus la température diminue, plus la durée de chauffage doit être longue. D varie donc selon la température, en suivant une loi similaire à celle décrite par la relation 1.

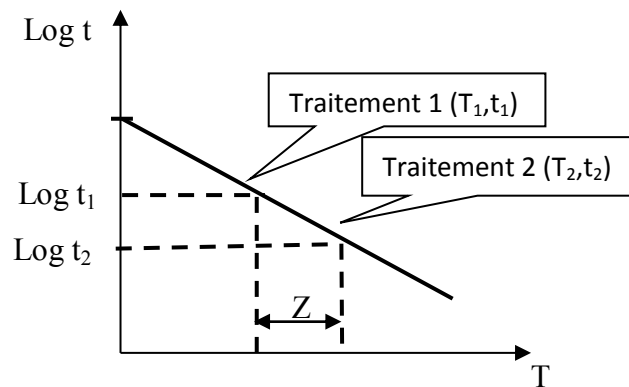
### 3.2.2. Température du traitement thermique

Pour un niveau défini de destruction microbienne (même objectif de destruction), une série d'expériences a été faite et les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau suivant :

|                     | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 | Essai 5 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $T, ^\circ\text{C}$ | 100     | 105     | 110     | 105     | 120     |
| $t, \text{min}$     | 330     | 100     | 32      | 10      | 4       |

En coordonnées semi logarithmique, cette fonction est une droite comme la montre la figure 5.

La courbe ainsi obtenue est dite courbe de destruction thermique des microorganismes.



**Figure 5** Courbe de destruction thermique des microorganismes.

### ***Traitement équivalents***

Le traitement 1 ( $T_1, t_1$ ) et le traitement 2 ( $T_2, t_2$ ) sont des traitements équivalents par leur action destructive (aboutissant au même objectif de destruction), car on a augmenté la température d'une valeur  $Z$  permettant de réduire 10 fois la durée de stérilisation ( $Z, ^\circ\text{C}$  : élévation de température entraînant une réduction du temps de chauffage de 90%).

### ***Relation entre les traitements équivalents***

D'après la droite :

$$\text{La pente} = -\frac{1}{Z} = \frac{\log t_2 - \log t_1}{T_2 - T_1}$$

Ce qui donne :

$$t_1 = t_2 10^{\frac{T_2 - T_1}{Z}}$$

Ou également :

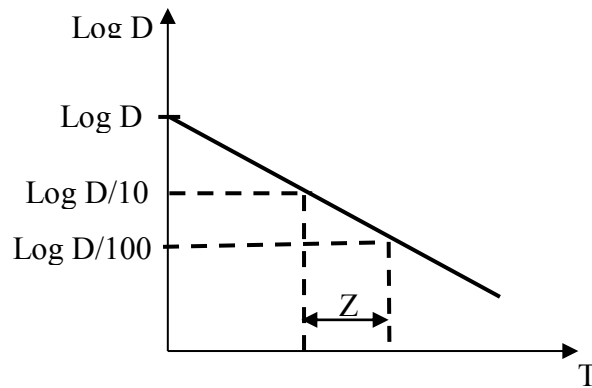
$$t_2 = t_1 10^{\frac{T_1 - T_2}{Z}}$$

### ***Relation entre $D$ et $Z$***

La relation liant le temps de réduction décimale  $D_1$  à une température de référence  $T_{\text{ref}}$  au temps de réduction décimale  $D$  à une autre température  $T$  est :

$$\log \frac{D}{D_1} = \frac{T_{\text{ref}} - T}{Z}$$

$D_1$  : le temps de réduction décimale à une température  $T_{\text{ref}}$  (en s) ;  $D$  : le temps de réduction décimale à une température  $T$  (en s) ;  $T_{\text{ref}}$  : température de référence (en  $^\circ\text{C}$ ) ;  $T$  : température (en  $^\circ\text{C}$ ) (figure 6).



**Figure 6** Effet de la température sur le temps de réduction décimale des bactéries

On constate que pour réduire D d'un facteur 10, il faut augmenter la température d'une valeur Z.

### ***Barème de base***

Des traitements de référence ont été établis :

Pour la pasteurisation,  $T_{\text{ref}} = 70^{\circ}\text{C}$  ;  $t_{\text{ref}} = P$

On peut donc écrire :

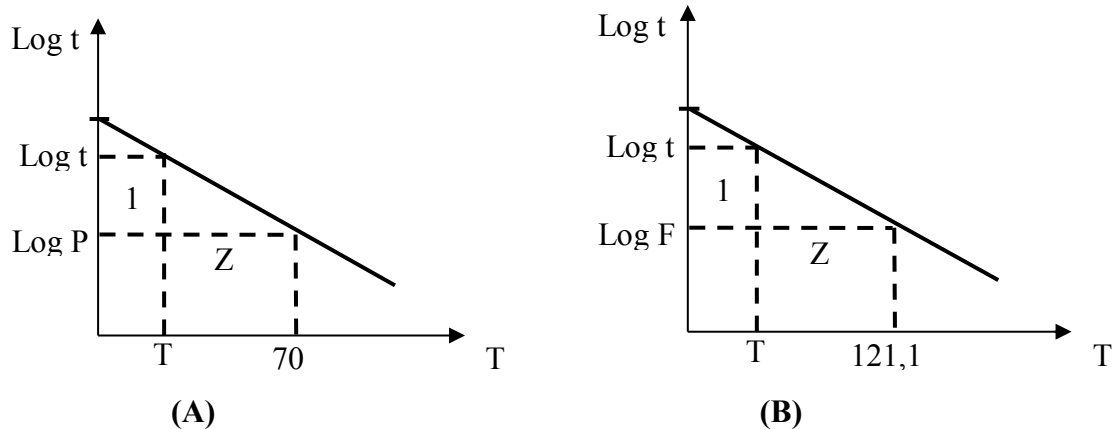
$$P = t \cdot 10^{\frac{T - T_{\text{ref}}}{Z}}$$

Pour la stérilisation,  $T_{\text{ref}} = 121,1^{\circ}\text{C}$  ;  $t_{\text{ref}} = F$

On peut donc écrire :

$$F = t \cdot 10^{\frac{T - T_{\text{ref}}}{Z}}$$

En connaissant P ou F et  $T_{\text{ref}}$  on peut définir n'importe quel traitement équivalent (T, t) de pasteurisation ou de stérilisation (figure 7).

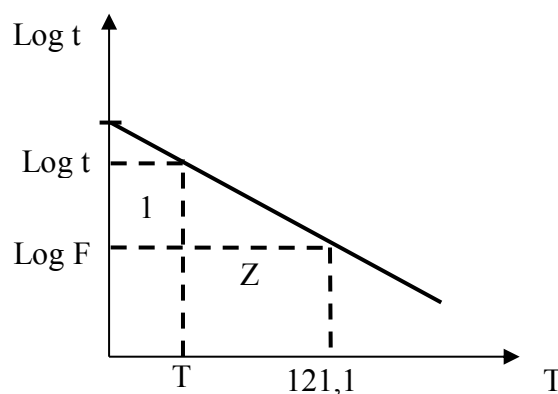


**Figure 7** Barèmes de références de pasteurisation (A) ou de stérilisation (B).

#### 4. Barème de stérilisation (ou de pasteurisation)

Comment définir un barème de stérilisation (ou de pasteurisation) ?

Un barème de stérilisation est défini en fonction : de la durée (F ou P) nécessaire pour obtenir à  $T_{\text{refer}}$  (121,1 ou 70°C) la stérilité pratique (c'est-à-dire ramener  $N_0$  à une valeur N désirée) (figure 8).



**Figure 8** Détermination du barème de stérilisation.

#### 5. Efficacité du traitement thermique

Elle est calculée en fonction de la réduction du nombre de microorganismes désiré qui est donné par la relation suivante. C'est le temps nécessaire pour atteindre l'objectif visé par la destruction microbienne.

**Pour la pasteurisation**, c'est la valeur pasteurisatrice, indiquée par P, P<sub>0</sub> ou V<sub>p</sub> :

$$P = D \log \frac{N_0}{N}$$

P: valeur pasteurisatrice (en s) ; N<sub>0</sub>: nombre initiale de microorganismes ; N : nombre de microorganismes restant après le traitement thermique.

Exemple : si dans le lait, nous voulons réduire le nombre de *Mycobacterium tuberculosis* d'un rapport N<sub>0</sub>/N= 10<sup>9</sup>, calculer P pour D=0,018 seconde.

Solution : P = 0,018 Log 10<sup>9</sup> = 0,018 x 9 = 0,162, soit P= 0,162 s.

**Pour la stérilisation**, c'est la valeur stérilisatrice, désignée par F, F<sub>0</sub> ou V<sub>s</sub>.

$$F = D \log \frac{N_0}{N}$$

La valeur D est connue pour un certain nombre de microorganismes tels que le *Clostridium botulinum* qui sert de test pour assurer la « stérilité commerciale ». Pour ce microorganisme, une diminution de N<sub>0</sub>/N égale à 10<sup>12</sup> fois (10<sup>12</sup> cellules de *Clostridium botulinum* détruites /g de produit) est suffisante pour assurer la stérilité du produit. Sa valeur D à 121,1 °C est de 0,21 min.

Donc, la valeur F du *Clostridium botulinum* est :

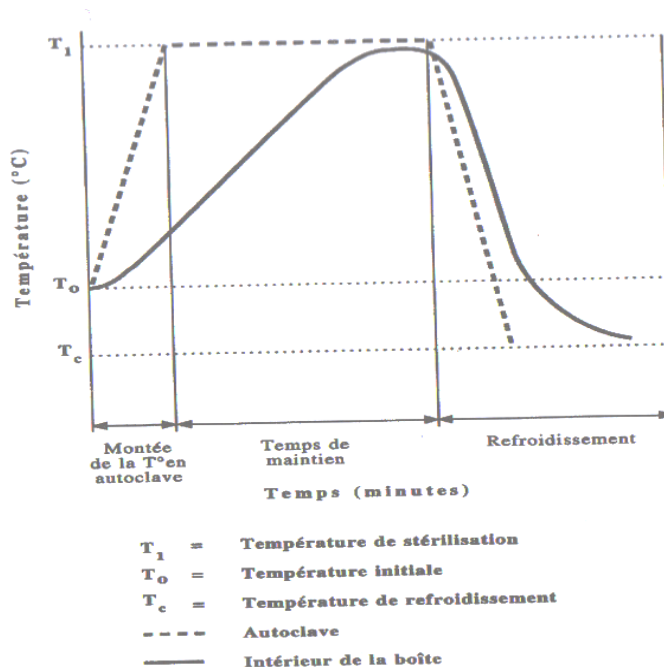
$$F = 0,21 \log 10^{12} = 2,52 \text{ min.}$$

Il faut donc 2,5 minutes à 121°C pour réduire la population microbienne de 10<sup>12</sup> fois. La stérilité commerciale est aussi appelée le traitement 12D, car il permet de réduire la population de 10<sup>12</sup> fois.

La stérilité commerciale est caractérisée par la destruction des cellules végétatives et des spores des microorganismes pathogène.

## 6. Courbes de pénétration de chaleur

Les courbes temps/température obtenues expérimentalement par le thermocouple placé au point le plus froid de la boîte de conserve ont généralement une allure de la forme suivante (figure 9) :



**Figure 9** Courbe de stérilisation

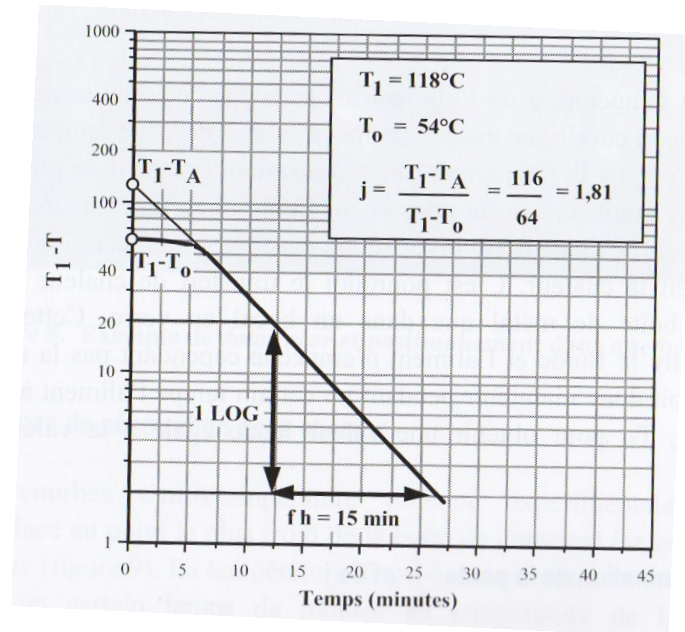
La température de l'aliment à l'intérieur de la boîte de conserve varie lentement de façon curviligne avec le temps pour arriver à une température maximale qui n'atteindra jamais la température de stérilisation  $T_1$ . Il est nécessaire de maintenir pendant un certain temps l'aliment la température de stérilisation  $T_1$ , pour obtenir une valeur létale égale à la valeur stérilisatrice recherchée.

Si on appelle  $-1/f_h$  la pente de la courbe et  $(T-T_1)$  l'ordonnée à l'origine (figure 7), l'équation de la courbe de chauffage s'écrira donc :

$$\frac{\text{Log}(T_1 - T) - \text{Log}(T_1 - T_A)}{t_h - 0} = -\frac{1}{f_h} \quad (10)$$

$T$  : température au centre de l'aliment au temps  $t$  (en °C) ;  $T_1 - T_A$  : ordonnées à l'origine de la prolongation de la droite des données obtenues de la courbe de chauffage (en °C) ;  $t_h$  : temps de chauffage (en min) ;  $f_h$  : temps pour traverser un cycle logarithmique sur la courbe de chauffage (en min).





**Figure 10** Courbe de chauffage en coordonnées semi-logarithmique

On peut constater sur la figure 10, qu'au début du chauffage, la courbe de montée en température n'atteint pas son allure linéaire immédiatement. Ce qui se traduit par un certain retard. Si  $T_0$  est la température initiale de la droite, on peut écrire :

$$T_1 - T_A = j(T_1 - T_0) \quad (11)$$

L'équation du chauffage pourra donc s'écrire :

$$t_h = f_h \text{Log} \left[ j \left( \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T} \right) \right]$$

Il en est de même pour le refroidissement :

$$t_c = f_c \text{Log} \left[ j \left( \frac{T_c - T_{\max}}{T_c - T} \right) \right]$$

$t_c$  : temps de refroidissement (en min) ;  $T$  : température au temps  $t$  (en °C) ;  $J_c$  : analogue du  $j$  pour la courbe de refroidissement ;  $F_c$  : temps pour traverser un cycle logarithmique sur la courbe de refroidissement (en min) ;  $T_{\max}$  : température maximum atteinte au point critique dans la boîte à la fin du chauffage (temps de maintien à  $T_1$ ).

## 7. La valeur létale

Pour avoir un traitement efficace, la valeur stérilisatrice (ou pasteurisatrice) doit être égale à la valeur létale (L). La meilleure méthode de calcul de cette valeur létale est de décomposer le traitement thermique en une série de traitements thermiques de courte durée (1min) pendant lesquels la température resterait constante, ce qui nous donne :

$$L = \sum_{i=1}^n 10^{\frac{T_i - 70}{10}} \Delta t_i$$

Avec  $\Delta t_i$  1min

$$\text{D'où : } P = \sum_{i=1}^n 10^{\frac{T_i - 70}{10}}$$

$T_i$  : température au centre de l'aliment à chaque minute (en °C) ;

$\sum_{i=1}^n$  : la sommation des valeurs entre la première minute de traitement et la n<sup>ième</sup> minute.

La sommation de toutes les valeurs létales mesurée en laboratoire au centre de l'aliment à chaque minute nous permet de connaître la valeur létale d'un traitement thermique. Le traitement est suffisant quand la valeur létale est égale à la valeur pasteurisatrice. C'est-à-dire, on calcule la valeur létale afin de vérifier si la valeur stérilisatrice (théorique) est atteinte. Il a été montré que la température est liée au temps (t) par une relation  $T=f(t)$  dont la nature peut varier quand T est constante ou quand T est une fonction logarithmique de t.

### a)- T est constante

Dans le cas où T est une constante, c'est –à-dire dans le cas des produits liquides, stérilisés dans des échangeurs de chaleur à plaque ou à surface raclée suivie d'un tube de retenue, on a :

$$L = \int_1^2 10^{\frac{T-121,1}{Z}} dt = \Delta t \cdot 10^{\frac{T-121,1}{Z}}$$

Où: dt : variation du temps entre  $t_1$  et  $t_2$  ;  $\Delta t = t_2 - t_1$  : temps de maintien dans le tube de retenue, à la température de stérilisation  $T_1$  ;  $t_1$  : temps initial (en min) ;  $t_2$  : temps final (en min).

**Exemple:**

Une soupe est stérilisée à 130 °C dans un échangeur de chaleur à surface raclée. Le traitement à appliquer pour détruire les mésophiles doit correspondre à une valeur  $F=6\text{min}$  pour un  $Z=10^\circ\text{C}$ .

**Solution:**

Si la stérilisation s'opère à 130°C, la montée et la descente en température étant immédiate, on peut calculer le temps de résidence dans le tube de retenue comme suit.

$$\Delta t = \frac{F}{10^{\frac{T-121,1}{Z}}}$$

$$\Delta t = \frac{6}{10^{\frac{130-121,1}{10}}} = 0,77 \text{ min}$$

**b)- T est une fonction logarithmique de t**

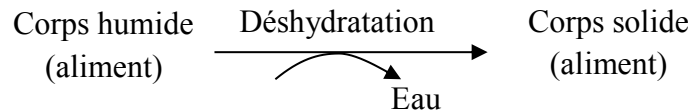
Dans ce cas, la valeur létale peut être donnée par la relation suivante :

$$L = f_h \cdot \frac{10^{\frac{T_1-121,1}{Z}}}{f_h/U} ; f_h/U : \text{une fonction de } (T_1 - T) \text{ et de } Z.$$

## **II.4. Séchage des aliments**

### **1. Définition et objectifs**

Le séchage (ou l'hydratation) est l'opération ayant pour but d'éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (solide ou liquide), le produit final obtenu étant toujours un solide (figure 1).



**Figure 1** Principe général de la déshydratation

Le séchage est procédé de conservation extrêmement ancien, dont le but principal est de convertir des denrées périssables en produits stabilisés par abaissement de l'activité de l'eau du produit. Les microorganismes ne peuvent plus se développer et la plupart des réactions de dégradation (réactions chimiques et enzymatiques) sont ralenties. Le séchage des aliments permet également :

- Faciliter la conservation des produits ;
- Diminuer la masse et le volume des aliments pour réduire leur encombrement et faciliter leur transport ;
- Donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit (café lyophilisé p.ex.).

### **2. Types de procédés de séchage**

Les aliments peuvent être séchés selon trois types de procédés :

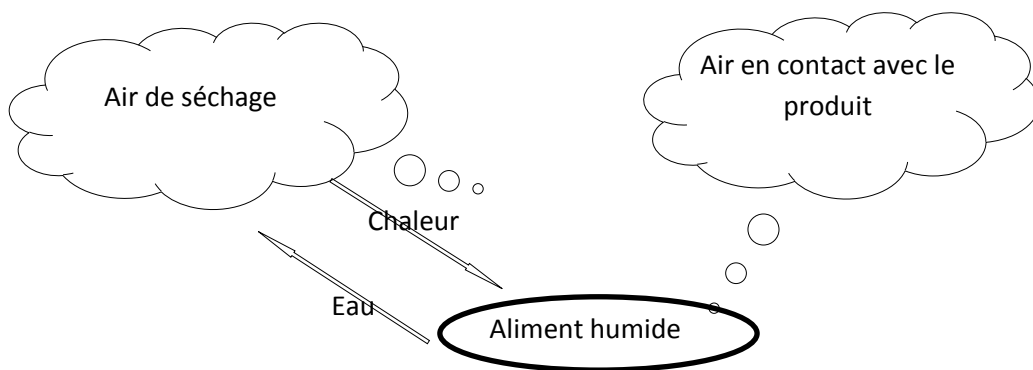
- Séchage par entraînement d'air (dite également séchage en contact avec la pression atmosphérique) : la chaleur est apportée à l'aliment soit par de l'air chaude (convection) ou par une surface chaude (conduction). Dans tous les cas, la vapeur formée se mélange à l'air, qui constitue le milieu servant à enlever celle-ci.
- Séchage sous vide ;
- Séchage par lyophilisation.

Le séchage par entraînement d'air est le procédé le plus utilisé, c'est la technique qui sera développée dans cette partie de cours.

## 2.1. Séchage des aliments par entrainement d'air

Le séchage par entrainement d'air consiste à placer l'aliment humide dans un courant d'air suffisamment chaud et sec. Dans ces conditions, il s'établit spontanément entre l'aliment humide et l'air deux types d'échange (figure 2):

- Transfert de chaleur : s'effectue de l'air de séchage vers le produit sous l'effet de l'écart de température ;
- Transfert matière (vapeur) : en sens inverse sous l'effet de l'écart de pression partielle d'eau entre l'air et la surface du produit.



**Figure 2** Transferts d'eau et de chaleur lors du séchage d'un aliment par entrainement d'air.

## 2.2. Paramètres thermodynamiques de l'air humide

Un air humide est un mélange d'air sec et d'eau sous forme de vapeur. De point de vu thermodynamique, l'air humide se caractérise par les paramètres suivants :

- Humidité : on distingue l'humidité relatives (HR) et l'humidité absolue (HA)
- Température : on distingue trois types de températures qui sont la température de thermomètre sec (T) la température de thermomètre humide ( $T_h$ ) et celle de rosée ( $T_r$ ).
- Enthalpie ( $h_m$ ).

### a)- L'humidité relative (HR)

Elle est définie par le rapport suivant :

$$HR = P_p / P_s \quad (1)$$

$P_p$  : pression partielle d'eau (en Pa) ;  $P_s$  : pression de vapeur saturante à la température (T) de l'air.

L'humidité relative exprime également le degré de saturation en vapeur de l'air :

$$HR = 100 (P_p/P_s) \quad (2)$$

Comme elle peut être définie par le rapport de l'humidité absolue de l'air à l'humidité absolue d'un air saturé à la même température et la même pression.

### **b)- L'humidité absolue (HA)**

L'humidité absolue d'un air humide exprime la teneur en eau d'un kilogramme d'air sec et elle est définie par la formule suivante :

$$HA = m_e/m_a \quad (3)$$

Où :  $m_e$  : quantité d'eau (kg) ;  $m_a$  : quantité d'air (1kg)

L'humidité absolue est exprimée également par des pressions partielles selon la relation suivante :

$$HA = \frac{18P_e}{29(P_t - P_e)} \quad (4)$$

$$P_t = P_e + P_a \quad (5)$$

$P_e$  : pression partielle de la vapeur d'eau ;  $P_a$  pression partielle de l'air ;  $P_t$  : pression totale

18 : masse molaire de l'eau (en g/mole) ; 29 : masse molaire de l'air (en g/mole).

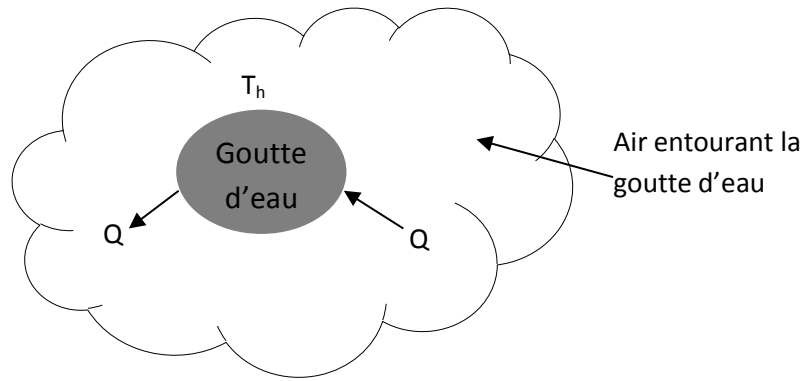
#### **▪ Relation entre HR et HA**

$$HA = \frac{18.HR.P_e}{29(P_t - HR.P_e)} \quad (6)$$

$$HA = \frac{0,621.HR}{\frac{P_t}{P_s} - HR} \quad (7)$$

### **c)- La température de thermomètre humide ( $T_h$ )**

Quand une petite quantité d'eau est placée dans une grande quantité d'air en mouvement, la température de cette eau tend vers une valeur d'équilibre, c'est la température humide ( $T_h$ ) (figure 3).



**Figure 3** Goutte d'eau placée dans de l'air

L'eau placée dans de l'air non saturé s'évapore, ce qui tend à diminuer sa température, et dès que la température de l'eau devient inférieure à la température de l'air ( $T_h$ ), il y a un transfert de chaleur.

### **Quantité de chaleur transmise (Q)**

La quantité chaleur (J/sec) transmise par convection à la goutte d'eau est définie par la relation suivante :

$$Q = L_e \cdot E \quad (8)$$

$L_e$  : chaleur latente d'évaporation de l'eau à la température  $T_h$  (kJ/kg) ;

$E$  : quantité d'eau évaporée (kg/sec) (=vitesse d'évaporation).

### **Exemple**

Quelle est la quantité de chaleur transmise à un aliment placé dans un courant d'air chauffé dans séchoir assurant une quantité d'évaporation d'eau de 25kg/sec. Sachant que  $L_e = 2420,28$  kJ/kg.

### **Solution**

On a :  $Q = L_e \cdot E$

$Q = 25 \times 2420,28$  kJ/sec.

**d)- La température de rosée ( $T_r$**

La température de rosé ( $T_r$ ) est la température du thermomètre sec à laquelle l'atmosphère en devient saturée de vapeur. La vapeur se condense en goutte d'eau (rosée). Toute réduction de la température sous le point de rosée entraîne la condensation d'une partie de la vapeur d'eau présente.

#### e)- Enthalpie ( $h_m$ )

L'enthalpie ( $H$ ) d'un air humide est la somme des enthalpies relatives de l'air sec et de la vapeur d'eau :

Soit pour un kg d'air sec contenant  $H_A$  kg d'eau à la température  $T$ , l'enthalpie relative du mélange par rapport à  $0^\circ\text{C}$  se calcule de la façon suivante :

$$H = H_e + H_a \quad (9)$$

$H_a$  : enthalpie d'un kg d'air sec;  $H_e$  : enthalpie de  $H_A$  kg d'eau à la température  $T$  (KJ/kg)

Où:

$$H_e = L_0 \cdot H_A + H_A \cdot C_e \cdot T \quad (10)$$

$L_0$ : chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $^\circ\text{C} \cdot \text{kJ/Kg}$ ) ;  $C_e$ : chaleur massique de la vapeur d'eau (KJ/kg. $^\circ\text{C}$ )

$$H_a = 1\text{kg} \cdot C_a \cdot T \quad (11)$$

$C_a$  : chaleur massique de l'air humide ; On a donc pour l'air humide :

$$H = L_0 \cdot H_A + (C_a + C_e \cdot H_A) \cdot T \quad (12)$$

Il est connu que :

$$L_0 = 2500,5 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$C_a = 1,01 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C} ;$$

$$C_e = 1,93 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}.$$

Donc :

$$H = (2500,5 + 1,93) H_A + 1,01 T \quad (13)$$



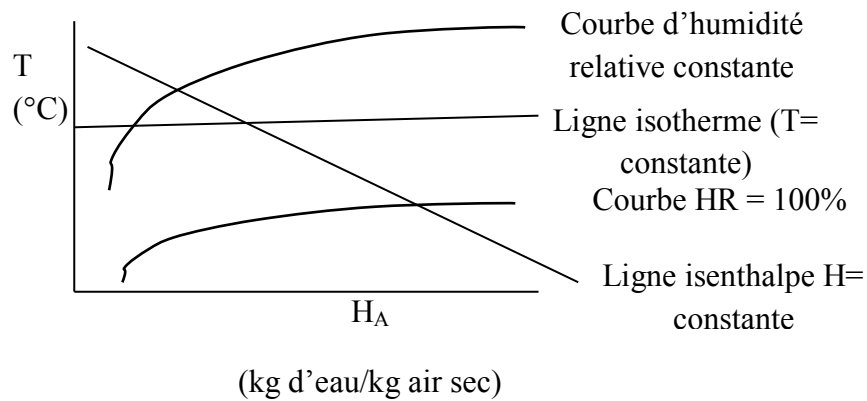
L'équation (13) est utilisée pour construire le diagramme enthalpique de l'air humide.

### 2.3. Diagramme enthalpique de l'air humide

Il s'appelle également « diagramme psychrométrique »

#### ▪ Description du diagramme

La figure 4 décrit les différentes composantes du diagramme enthalpique.



**Figure 4** Composantes du diagramme enthalpique

#### ▪ Lecture sur le diagramme enthalpique

Les paramètres thermodynamiques sont déterminés de la façon suivante :

$H_A$  : se lit sur l'axe des abscisses

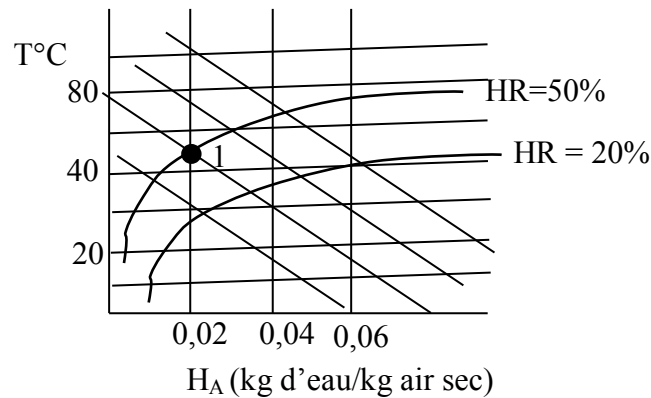
$H$  : se lit directement sur l'isenthalpe

$HR$  : se lit sur la courbe de l'humidité relative.

$T$  : se lit sur l'isotherme.

#### Exemple

Déterminer, à l'état 1, les paramètres thermodynamiques suivants :  $HR$ ,  $H_A$ ,  $H$  et  $T$ .

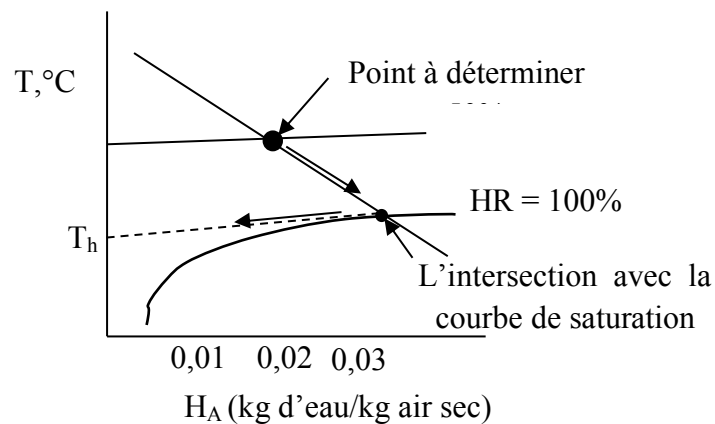


### Solution

HR = 50% ;  $H_A = 0,02$  kg d'eau/kg d'air sec ;  $H = 80$  kJ/kg ;  $T = 50^\circ\text{C}$ .

#### ▪ Détermination de $T_h$

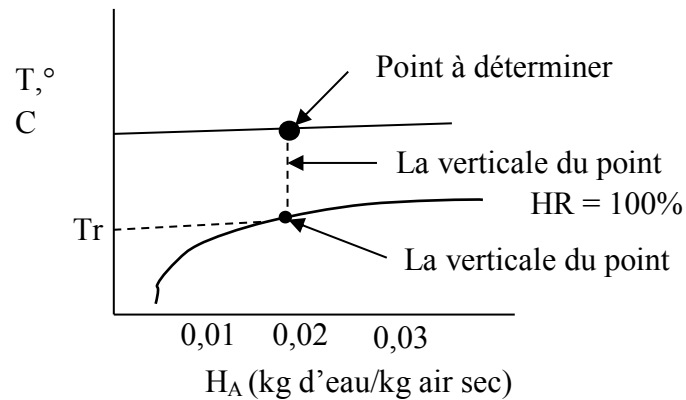
La température humide ( $T_h$ ) se lit sur l'axe des ordonnées à l'intersection de l'isenthalpe avec la courbe de saturation (HR=100%) (Figure 5).



**Figure 5** Détermination de la température humide sur le diagramme enthalpique.

#### ▪ Détermination de $T_r$

La température de rosée  $T_r$  est lue sur l'isotherme à l'intersection de la courbe de saturation (HR= 100%) et de la verticale du point à déterminer.



**Figure 6** Détermination de la température de rosée ( $T_r$ ).

#### ▪ Détermination de l'enthalpie (H)

L'enthalpie de l'air humide (H) est déterminée soit à partir de l'équation (13), soit directement sur le diagramme enthalpique.

### 2.4. Application du diagramme enthalpique lors du séchage des produits alimentaires

L'air, lors du séchage des aliments passe par trois étapes, constituant ce que l'on appelle « cycle de l'air du séchage » (figure 7).

#### ▪ Cycle de l'air du séchage

✓ **Première étape (point 1)** : l'air est frais (avant son chauffage) et est caractérisé par :

$HA_1 =$  basse valeur ;  $T_1 =$  basse valeur ;  $H_1 =$  basse valeur

✓ **Deuxième étape (point 2)** : l'air est chaud (après son chauffage) et est caractérisé par :

$HA_2 = HA_1$  ;

$T_1 \gg T_2$  : le chauffage de l'air permet d'augmenter la température de celui-ci d'une valeur initiale  $T_1$  à  $T_2$ .

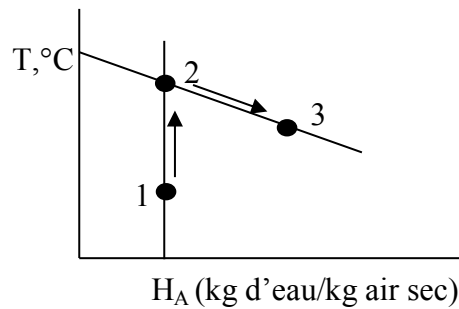
$H_1 \gg H_2$  : la chaleur fournie à l'air pour qu'il chauffe (est une énergie) permet l'augmentation de son enthalpie initiale  $H_1$  à  $H_2$ .

✓ **Troisième étape (point 3)** : l'air en contact avec le produit (humide) à sécher est caractérisé par :

$HA_3 \gg HA_2 = HA_1$  : l'eau dégagé de l'aliment à sécher est capté par l'air de séchage. Ceci permet d'augmenter sa teneur en eau initiale  $HA_1$  à une teneur supérieure  $HA_3$ .

$T_3 \gg T_2$  : la vapeur dégagée diminue la température de l'air de séchage.

$H_3 = H_2$  : le contact de l'air avec le produit ne change pas son enthalpie.



**Figure 7** Cycle de l'air de séchage.

▪ **Quantité d'eau évaporée par 1kg d'air sec (E1)**

$$E1 = HA_3 - HA_1 \text{ ou } HA_3 - HA_2, \text{ car } HA_1 = HA_2$$

▪ **Quantité d'énergie fournie pour chauffer 1kg d'air sec (Q1)**

$$Q1 = H_2 - H_1 \text{ ou } H_3 - H_1, \text{ car } (H_3 = H_2)$$

**Exemple**

De l'air humide dont la température est  $T1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $HA1 = 0,01 \text{ kg/gk}$ ,  $HR = 70\%$ ,  $H1 = 45 \text{ kJ/kg}$  est chauffé à  $T2 = 70^\circ\text{C}$ . Son enthalpie est alors de  $100 \text{ kJ/kg}$ ,  $HR = 0,05$ . En contact avec le produit sa température devient  $T3 = 55^\circ\text{C}$ .

- Déterminer les paramètres thermodynamiques de l'air après son contact avec le produit.
- Quelle est la quantité d'air sec nécessaire pour éliminer 1kg d'eau.
- Quelle est l'énergie fournie pour chauffer 1kg d'air sec
- Calculer le coût énergétique de l'évaporation d'un kg d'eau.

**2.5. Courbes de séchage**

Les courbes de séchage peuvent être représentées de trois façons :

Teneur en eau (w) en fonction du temps, t ;

- Vitesse de séchage ( $dw/dt$ ) en fonction du temps, t ;
- Vitesse séchage ( $dw/dt$ ) en fonction de la teneur en eau, w.

▪ **Teneur en eau**

La teneur en eau est exprimée par différentes formes. Elle peut être exprimée par :

- Kg d'eau /kg de matière sèche (ms) ;
- Kg d'eau /kg matière humide (mh) ;

- Kg d'eau par 100 kg ms ;
- Kg d'eau/100kg mh.

Toutefois, la teneur en eau est préférablement exprimée par rapport à la masse sèche, la composante stable lors du séchage.

Si H est la quantité d'eau présente dans un produit alimentaire, on peut écrire alors :

$$mh = ms + H \quad (14)$$

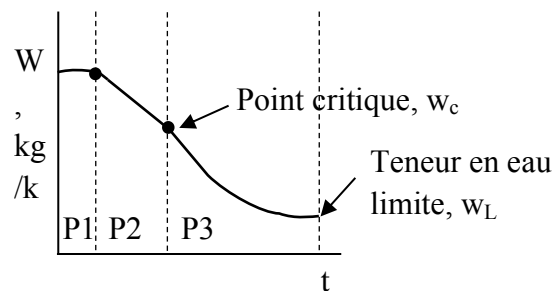
La teneur en eau (w) peut être définie par les relations suivantes :

$$w(kg/100kg.ms) = \frac{H}{ms} 100 \quad (15)$$

$$w(kg/100kg.mh) = \frac{H}{mh} 100 \quad (16)$$

#### ▪ Périodes de séchage

La figure 8 montre les trois périodes de séchage.



**Figure 8** Périodes de séchage.

La teneur en eau passe généralement lors du séchage par trois périodes :

- P1 : correspond à la mise en température, c'est une courte phase, elle est souvent négligeable.
- P2 : correspond à l'élimination de l'eau libre (l'activité de l'eau ( $a_w$ ) voisine le 1, à la surface du produit) ;
- P3 : correspond à l'élimination de l'eau liée (l'activité de l'eau ( $a_w$ ) est inférieure à 1, à la surface du produit).

Souvent, les deux premières périodes sont négligeables pour de nombreux produits (surtouts s'ils sont sous forme de poudre), l'évolution de la teneur en eau peut être décrit par la relation suivante:

$$\frac{dw}{dt} = -k_T w \quad (17)$$

$K_T$  : constante vitesse de séchage (kg d'eau/kg de ms.s)

Donc, on peut écrire :

$$\log \frac{w_0}{w} = \frac{t}{D_T} \quad (18)$$

$D_T$  : temps de réduction décimale de la teneur en eau initiale ( $w_0$ ).

$$D_T = \frac{2,3}{K_T} \quad (19)$$

Egalement, il est possible de décrire le séchage en utilisant l'évolution de l'humidité réduite ( $H_r$ ) en fonction du temps ( $t$ ), telle que :

$$H_r = \frac{w_t - w_e}{w_0 - w_e} \quad (20)$$

$W_t$  : teneur en eau à  $t$  quelconque

$W_e$  : teneur en eau d'équilibre.

#### ▪ Temps de séchage

##### **a- pendant la période à vitesse constante**

Le temps d séchage pendant la période de séchage à vitesse constante ( $t_c$ ) s'obtient par la relation suivante :

$$t_c = \frac{E_c}{E} \quad (21)$$

$E$  : vitesse de séchage (kg d'eau/sec) = quantité d'eau évaporée pendant un certain temps ( $t$ , sec).

$E_c$  : quantité d'eau évaporée pendant la période à vitesse constante (en kg).

$$E_c = (w_0 - w_e).ms \quad (22)$$

$W_0$  : teneur en eau de l'aliment à l'entrée du sécheur (en kg/kg de ms).

$W_c$  : teneur en eau de l'aliment à la fin de la période à vitesse constante (en kg/kg de ms).

### **Exemple**

Dans un sécheur à air, 50 kg de légumes, coupés en petits morceaux, sont séchés de 90% à 10%. Au point critique ( $w_c$ ), la teneur en eau est 70 kg/100 kg de ms. Calculer le temps de séchage pendant la période à vitesse constante, sachant que  $E = 4.10^{-3}$  kg/s.

#### **b- pendant la période à vitesse décroissante**

Il existe deux cas :

##### **✓ Vitesse contrôlée par écoulement capillaire**

Le temps de séchage ( $t_d$ ) pendant cette période est calculé par la formule :

$$t_c = \alpha(w_c - w_e).Ln\left(\frac{w_c - w_e}{w - w_e}\right) \quad (23)$$

$w$ : teneur en eau à  $t$  quelconque (en kg/kg ms),  $w_e$  : teneur en eau au point d'équilibre (en kg/kg ms),  $\alpha$  : constante dépendant de la forme et de l'épaisseur du produit.

##### **✓ Vitesse contrôlée par la diffusion**

$$t_c = A.Ln\left(B \frac{w_c - w_e}{w - w_e}\right) \quad (24)$$

A et B sont des constantes dépendantes de la forme, de l'épaisseur du produit et de la diffusivité massique de l'eau dans le produit.

## **II.5. Réfrigération et congélation des aliments**

La conservation des aliments par le froid est une des techniques les plus répandues. Le froid renferme deux procédés, la réfrigération et la congélation.

### **1. Réfrigération des aliments**

La réfrigération, ou le froid positif, consiste à entreposer les aliments à une température basse, proche du point de congélation, mais toujours positive. A ces températures, la vitesse de développement des microorganismes contenus dans les aliments est ralentie. La réfrigération est utilisée pour la conservation des aliments périssables à court et moyen terme. La durée de conservation va de quelques jours à plusieurs semaines suivant le produit, la température, l'humidité relative et le type de conditionnement.

Des règles fondamentales doivent être respectées dans l'application du froid : la réfrigération doit être faite le plus tôt possible après collecte, elle doit s'appliquer à des aliments initialement sains et être continue tout au long de la filière de distribution.

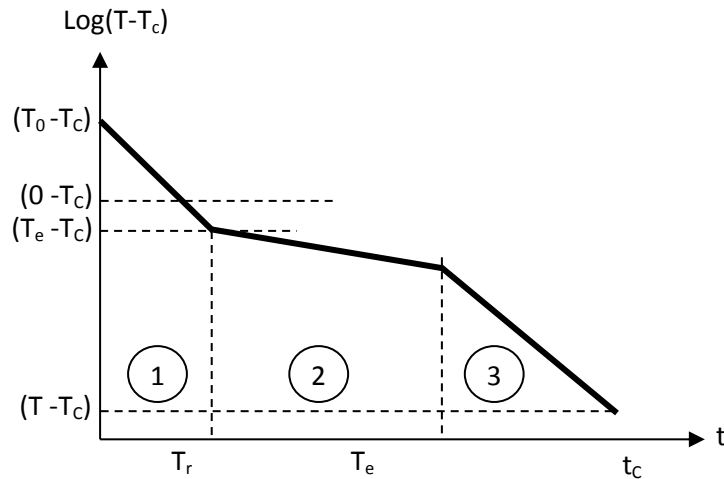
### **2. Congélation des aliments**

La congélation consiste à entreposer les aliments à des températures inférieures au point de congélation, généralement -18 °C. Elle est utilisée pour la conservation des aliments à long terme (4 à 24 mois). Pendant la congélation, l'activité métabolique de la plupart des germes pathogènes et d'altération est inhibée. Cependant, les réactions d'altération chimique ne sont pas arrêtées complètement. Les plus importantes de ces réactions sont l'oxydation enzymatique des lipides, l'hydrolyse des glucides et la lipolyse. Pour en remédier, les industriels procèdent généralement à un blanchiment des produits (cas des légumes surgelées) avant leur congélation.

#### **2.1. Cinétique de congélation**

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





**Figure 1** Evolution de la température dans l'aliment lors de la congélation

$T_0$  : température initiale de l'aliment ;  $T_c$  : température de la congélation (ou de congélateur) ;  $T_e$  : température de congélation commençante.

**Phase 1** : refroidissement de l'aliment de  $T_0$  au point de congélation commençante (ou de changement d'état de l'eau)  $T_e$  durant  $t_r$ .

**Phase 2** : changement d'état de l'eau passant de l'état liquide à l'état solide : la chaleur latente de changement d'état est absorbée ; la température du produit varie peu. Cette phase dure un temps  $t_e$ .

**Phase 3** : abaissement de la température jusqu'à la température de fin de congélation ( $T_c$ ). Cette phase dure un temps  $t_c$ .

**a)- température de congélation commençante**

Elle est donnée par la loi de Raoult :

$$\Delta T_e = \frac{RT_k^2 C}{LM}$$

$\Delta T_e = 0 - T_e$  (en °C) ;  $R$  : constante des gaz parfaits (8,314 J/ K.mole) ;  $T_k$  : température de fusion de l'eau (273,1 K) ;  $L$  : chaleur latente de fusion de l'eau (334800 J/Kg) ;  $M$  : masse molaire du soluté.

Donc :  $\Delta T_c = 0 - T_e = 1,85 \frac{C}{M}$

**b)- Pourcentage d'eau congelée**

Elle est calculée par la loi de Bartlett (1944) :

$$\ln X = \frac{L}{R.55,6} \left( \frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_c} \right) = 724. \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_c} \right)$$

X : fraction molaire de l'eau congelée ; 55,6 : nombre de mole d'eau par kg d'eau.

Cependant Schwartzberg et al. (1977) ont proposé l'utilisation de l'équation suivante :

$$Y = \frac{T_c - T_e}{T_c} ; T_e \text{ et } T_c \text{ sont en } ^\circ\text{C} ; Y : \text{quantité d'eau congelée.}$$

**2.2. Variation de l'enthalpie durant la congélation**

Congélation : c'est l'enlèvement d'une certaine quantité de chaleur du produit.

La variation d'enthalpie ( $\Delta H$ , KJ/Kg), pour 1kg de produit est calculée selon l'équation suivante :

$$\Delta H = C_p^+(T_0 - T_e) + L + C_p^-(T_e - T_c)$$

L : chaleur latente de fusion de l'eau (334800J/Kg) ;  $C_p^+$  : chaleur massique du produit non congelé (en J/kg°C) ;  $C_p^-$  : chaleur massique du produit congelé (en J/kg°C) ;  $T_0$  : température initiale (en °C) ;  $T_e$  : température de début de congélation (en °C) ;  $T_c$  : température de fin de congélation (en °C) ; w : pourcentage d'eau du produit.

Si on connaît le % d'eau congelé (Y) on a une meilleur évaluation de  $\Delta H$  par l'équation suivante :

$$\Delta H = C_p^+(T_0 - T_e) + Y.W.L + C_p^-(T_e - T_c)$$

Y : le pourcentage d'eau congelée divisé par 100.

**2.3. Temps de congélation**

La détermination du temps de congélation permet de déterminer le temps de séjour pour un appareil discontinu, et le débit pour un appareil continu.

### ***a- Evaluation de $t_r$***

D'après de la courbe de refroidissement :

$$t_r = f_r \cdot \log \left[ j_r \left( \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T_e} \right) \right]$$

$f_r$  et  $j_r$  sont déterminé à partir de  $N_{B,r}$ .

### ***b- Evaluation de $t_c$***

Le temps  $t_c$  est évalué en utilisant l'équation suivante :

$$t_c = f_c \cdot \log \left[ j_c \left( \frac{T_1 - T_e}{T_1 - T_0} \right) \right]$$

$f_c$  et  $j_c$  sont déterminé à partir de  $N_{B,c}$ .

### ***c- Evaluation de $t_e$***

Le temps  $t_e$  est évalué en utilisant l'équation suivante :

$$t_e = \frac{\rho + W \cdot L Y_m D^2}{(T_e - T_1) K^-} \left[ \frac{P}{2 N_{B,e}} + R \right]$$

$Y_m$  : Pourcentage de glace formé moyen ;  $Y_m = (Y_1 + Y_2)/2$  ;  $Y_1$  : Pourcentage de glace formé à  $T_c$  ;  
 $Y_2$  : Pourcentage de glace formé à  $T_1$ .

Selon la vitesse de congélation des aliments, on distingue :

▪ **La congélation rapide ou surgélation** : au cours de laquelle les denrées sont stabilisées par abaissement rapide de la température jusqu'à  $-18^\circ\text{C}$  à cœur. Cette technique permet la formation de nombreux et petits cristaux de glace qui ne détériorent pas l'aliment. Seul un faible exsudat se produit lors de la décongélation.

▪ **La congélation lente** : le refroidissement de l'aliment s'effectue lentement ce qui entraîne la formation de cristaux de glace de taille relativement importante par rapport à celle des cellules du produit. Les aiguilles tranchantes des cristaux de glace peuvent percer et déchirer la paroi des cellules peu résistantes et favoriser une certaine exsudation lors de la décongélation.

## **2.4. Procédés de congélation**

Plusieurs techniques de congélation des produits alimentaires peuvent être utilisées. Parmi elles on distingue les congélateurs à plaques, les congélateurs à tunnels, et congélateurs cryogéniques (congélation directe).

### ***Congélateurs à tunnels***

Les congélateurs à tunnels utilisent l'air pulsé comme fluide frigorigène intermédiaire. Celui-ci est refroidi à travers l'évaporateur de la machine frigorigène, pulsée sur le produit par un ventilateur, puis recyclé pour être refroidi à nouveau. Ce système existe en continu et en discontinu. L'avantage des tunnels de congélation réside dans leur souplesse d'utilisation. Ils sont recommandés lorsqu'on est amené à congeler plusieurs types de produits, de forme et de taille différente.

### ***Congélateurs à plaques***

Dans le cas des congélateurs à plaques, le produit est refroidi au contact de la surface des plaques, à l'intérieure desquelles circule le fluide frigorigène. Ce type de congélateurs peut être à plaques horizontales ou verticales selon que les plaques sont disposées horizontalement (sous forme d'étagères) ou verticalement. Leur avantage réside dans leur efficacité énergétique. Malheureusement, ils ne peuvent être utilisés que pour des produits de forme géométrique, avant ou après emballage, régulière. De plus, ils ne sont plus aptes au fonctionnement continu.

### ***Congélateurs cryogéniques***

La congélation cryogénique (ou directe) consiste à mettre le produit directement en contact avec une source de froid, par aspersion d'un liquide comme l'azote liquide ou le CO<sub>2</sub> liquide qui s'évaporent au contact du produit. Dans ce cas, l'apport frigorigène est apporté par la chaleur latente d'évaporation du liquide en contact avec le produit (l'azote liquide s'évapore à -196 °C et le CO<sub>2</sub> liquide s'évapore à -54 °C). Ce système de congélation a l'avantage d'être rapide et ne nécessitant pas une installation frigorigène proprement dite. Toutefois, il est assez coûteux et ne peut être donc utilisé que pour les produits alimentaires à haute valeur marchande.

## **2.5. Effet de la congélation sur les aliments**

Bien que la congélation ne détruise pas les microorganismes, certaines bactéries, notamment à gram négatif disparaissent progressivement lors de l'entreposage. D'autres comme les salmonelles, les

coliformes, les spores, les staphylocoques, microcoques et streptocoques ne sont pas du tout affectées. En général, toute activité de bactéries cesse à -8°C et -10°C pour les moisissures.

Lors de l'entreposage, la qualité des aliments congelés baisse progressivement en raison de modifications biochimiques et physiques.

### ***Modifications biochimiques***

- Pour les fruits : brunissement enzymatique (réactions enzymatiques) ;
- Pour les légumes : altération de la couleur et l'arôme sous l'effet des enzymes (peroxydase, catalase qui agissent même à très basse température) ;
- Pour les viandes et poissons : limite de leur conservation à cause de l'activité des lipases restant actives jusqu'aux températures très basses.

Des réactions non enzymatiques peuvent être observées telles que l'oxydation des lipides, des pigments, et des arômes affectant ainsi la durée de conservation.

### ***Modifications physiques***

La formation des cristaux au sein des aliments affecte la texture et l'aspect des produits. Elle contribue à la dessiccation en surface des aliments ce qui entraîne une perte de poids, favorise l'oxydation des lipides, le durcissement (poissons et viandes) et l'apparition de taches à la surface pour la viande.

### ***Effet de la vitesse de congélation***

La congélation augmente de la concentration des solutés dans l'eau non congelé ce qui augmente, entre -5 et -15°C, la vitesse de réaction des solutés entre eux ou avec les constituants cellulaires des cellules de l'aliment, telles que l'oxydation, l'hydrolyse et de l'insolubilisation des protéines. En dessous de -15°C, la vitesse de réaction diminue rapidement à cause de la baisse de température. La concentration des solutés entraîne la baisse du pH, l'augmentation de la force ionique et de la pression osmotique, qui sont responsables de la déstabilisation du gel cytoplasmique des cellules. Afin de limiter ces effets, il convient d'appliquer une congélation rapide et de congeler l'aliment à -20°C.

## **II.6. Conservation par les rayonnements ionisants**

### **1. Définition d'un rayonnement ionisant (RI)**

Deux définitions peuvent être figurées :

- Un rayonnement est dit ionisant s'il possède une énergie suffisante pour créer des ions au sein de la matière irradiée.
- Lorsque l'énergie d'un rayonnement est supérieure à celle de l'ionisation de l'atome d'hydrogène (13,6 eV), le rayonnement est dit ionisant (l'énergie de liaison des électrons périphériques des atomes est inférieure à celle de l'hydrogène). Donc un rayonnement ionisant est un rayonnement qui ionise tout type d'atome.

### **2. Objectif de l'ionisation**

L'ionisation est une technique physique qui permet :

- D'améliorer la qualité hygiénique des aliments ;
- D'augmenter la durée de vie par destruction des microorganismes ;
- De détruire les insectes ;
- De bloquer les processus physiologiques tels que la germination (pomme de terre).

### **3. Sources des rayonnements ionisants**

Les rayonnements ionisants sont de deux natures différentes :

- Rayonnements électromagnétiques  $x$  et  $\gamma$  ;
- Rayonnements corpusculaires (faisceaux d'électrons).

#### **3.1. Rayonnement $\gamma$**

Les rayonnements  $\gamma$  proviennent de la désintégration du cobalt 60 ( $^{60}\text{Co}$ ) ou du césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ). Industriellement c'est le cobalt 60 qui est utilisé. Le césium 137 étant moins disponible et il a des impacts sur l'environnement.

Le cobalt 60 est un radionucléide artificiel produit dans des réacteurs nucléaires à partir du cobalt 59. Le cobalt 60 est radioactif et émet des rayonnements  $\alpha$ ,  $\beta$  et deux photons  $\gamma$ , l'un est de 1,33 Mev et l'autre 1,17 Mev.

Le radionucléide émet des rayonnements durant une période dite période radioactive peut être exprimée en durée en demi-vie. Pour le Cobalt 60, la durée de demi-vie est 5,27 ans.

La durée de vie peut être également exprimée par le nombre de Curie (Ci) ( $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$  becquerel (Bq) où  $1 \text{ Bq} = 1$  désintégration par seconde).

### **3.2. Rayonnement X**

Les rayonnements X sont des rayonnements qui proviennent des accélérateurs d'électrons par interaction du faisceau d'électrons avec une cible métallique de conversion en tungstène ou tantale.

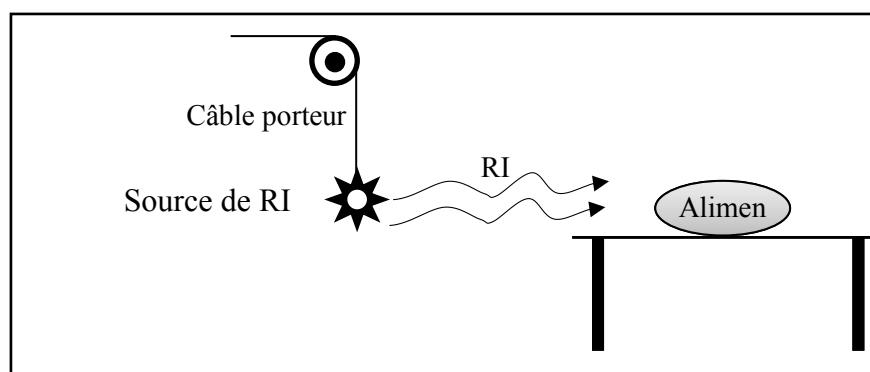
Les rayonnements X sont moins utilisables vu la technique compliquée, bien que l'énergie fournie est de l'ordre de 5 Mev.

### **3.3. Rayonnement corpusculaires (faisceaux d'électrons).**

Les faisceaux d'électrons ou rayonnement  $\beta^-$  sont des particules générées par des accélérateurs (générateurs) électriques constitués d'une source d'électrons, d'un tube accélérateur et d'un système de mise en forme du faisceau d'électrons.

## **4. Principe de l'ionisation**

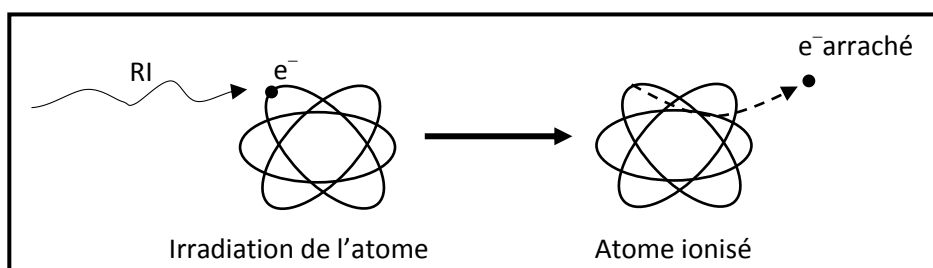
La conservation par les rayonnements ionisants consiste à soumettre l'aliment à l'action directe de radiation ionisante dont le but est de lui transmettre de l'énergie. Sous l'effet de cet apport d'énergie, les atomes perdent des électrons et acquièrent des charges électriques, c'est le phénomène d'ionisation (figure 1).



**Figure 1** Principe de l'ionisation des produits alimentaires'

## 5. Mécanismes d'action des rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants interagissent avec la matière irradiée. Ces rayonnements possèdent une énergie suffisante pour perturber les niveaux d'énergie électroniques des atomes notamment ceux de forte densité électroniques ( $O_2$ ,  $N_2$ , S). Il peut en résulter des ruptures des liaisons covalentes tout en arrachant un électron orbital convertissant ainsi les atomes en ions (figure 2).

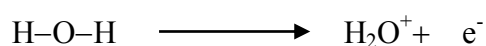
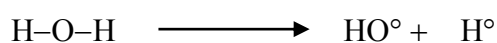


**Figure 2** Mécanismes d'action des rayonnements ionisants sur les atomes ( $e^-$  : électron orbital).

## 6. Effet des rayonnements ionisants

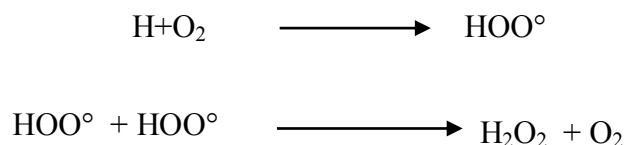
### 6.1. Formation des radicaux libres (RL)

Les RL sont des composants très réactifs et ils peuvent continuer leur action après le traitement et au cours de la conservation. L'élément le plus apte à s'ioniser est la molécule d'eau. L'eau des tissus et des aliments donne des RL et des ions :





En présence de l'oxygène moléculaire, il peut y avoir formation de peroxyde d'hydrogène :



## 6.2. Effet sur l'ADN

Les éléments constitutifs des cellules, dont l'ADN, subissent des modifications soit sous l'action des rayonnements ou des électrons, soit par interaction avec les produits issus de la radiolyse. Ces modifications structurales de l'ADN entraînent la destruction des microorganismes.

## 6.3. Effet sur la valeur nutritionnelle

Le traitement ionisant peut parallèlement générer des pertes des nutriments notamment de certaines vitamines et donner naissance à des produits volatils altérant la qualité sensorielle de l'aliment par dégradation des acides aminés soufrés et des lipides.

L'ionisation des aliments engendre également la formation des substances toxiques telles que le cyclobutanone obtenus par cyclisation des acides gras.

## 7. Dose et débit du traitement ionisant

L'effet du traitement ionisant dépend de la dose d'ionisation ( $D_i$ ) définie par la quantité d'énergie déposée par le rayonnement dans un échantillon d'aliment. Elle est exprimée en Gray (Gy) (1Gy correspond à l'absorption d'un joule par kg de produit (J/kg)).

Le débit de l'ionisation ( $D$ ) est la quantité d'énergie délivrée par unité de temps ( $t$ ):

$$D_i = D \times t \quad (1)$$

Selon la dose et l'objectif du traitement ionisant, on peut distinguer :

▪ **Radication** : équivalent à une thermisation. C'est une destruction partielle des microorganismes.

La dose mise en jeu est de l'ordre de 1 à 4kGy.

▪ **Radurisation** : c'est l'équivalent à une pasteurisation. La dose appliquée dans ce cas est de 4 à 10 kGy.

▪**Radappertisation** : équivalent à une stérilisation. La dose appliquée varie de 15 à 50 kGy.

### 8. Destruction des microorganismes

La destruction des microorganismes par l'irradiation peut être définie par une loi analogue à celle du traitement thermique. Elle suit en effet une loi d'ordre 1 :

$$\frac{dN}{dE} = -KN \quad (2)$$

N : nombre de microorganismes à l'instant t.

E : énergie mise en œuvre (Gy)

K : constante de destruction ( $\text{Gy}^{-1}$ ) dépendant des microorganismes.

En intégrant l'équation entre  $N_0$  (nombre initial de microorganismes) à  $t=0$  et N à  $t=t$ , on obtient :

$$\log\left(\frac{N_0}{N}\right) = \frac{E}{E_{10}} \quad (3)$$

$$\text{Où : } E_{10} = \frac{2.3}{K} \quad (4)$$

$E_{10}$  : dose de destruction décimale des microorganismes (Gy).

## **II.7. Autres techniques de stabilisation des aliments**

### **1. Conservation des aliments par les additifs de conservation**

#### **1.1. Définition**

Un additif de conservation peut être défini comme étant une substance chimique incorporée dans un aliment afin d'accroître sa stabilité chimique, biochimique ou biologique. Les additifs sont parfois ajoutés aux aliments également pour l'amélioration de la qualité organoleptiques des produits alimentaire.

#### **1.2. Conditions d'addition des additifs conservateurs**

Deux principales conditions doivent être respectées afin d'assurer une bonne efficacité des additifs conservateurs :

- Le produit alimentaire doit être de bonne qualité hygiénique : aucun additif licite ne peut rendre propre un aliment impropre ;
- La répartition de l'additif doit être homogène : la substance est ajoutée à l'aliment en faible quantité et une mauvaise répartition pourrait ne pas préserver la totalité du produit ou peut engendrer un sur dosage local.

#### **1.3. Quels sont les additifs de conservation ?**

Deux grandes classes sont à distinguer :

##### **1.3.1. Les additifs antimicrobiens**

Leur action est dirigée contre les microorganismes. Leur rôle est donc d'accroître la stabilité du produit en limitant le développement des microorganismes (moisissures, bactéries). On distingue plusieurs types d'antimicrobiens :

##### **❖ Le sel NaCl (salage)**

Le NaCl exerce un effet bactériostatique en abaissant l'activité de l'eau des produits et donc en limitant le développement des microorganismes. Son action se manifeste pour des concentrations supérieures à 5%.

A 5%, il peut inhiber la plupart des bactéries anaérobies et ralentit la croissance des bactéries aérobies.

Le NaCl est utilisé pour la conservation des viandes, des poissons et des légumes.

Il existe deux techniques de salage : soit à sec, ou en saumure (solution concentrée).

#### ❖ Les sels nitrates

Les nitrates et les nitrites inhibent un certain nombre de pathogènes, notamment *Clostridium botulinum* susceptible d'être présent dans les aliments crus.

Ils ont également un rôle organoleptique : par interaction avec la myoglobine il forme un complexe dit « nitrosomyoglobine » qui confère à la viande une couleur rouge et stable. Ces substances présentent l'inconvénient d'être réactif avec les amines pour former des nitrosamines reconnus comme étant fortement cancérogènes.

#### ❖ Les sucres (sucrage)

##### ▪ Sucres utilisés

Les sucres les plus utilisés sont le saccharose, le glucose, le fructose et dans une moindre mesure le sorbitol et le mannitol. Les sucres jouent un rôle de par leur effet dépresseur de l' $a_w$  au niveau de la conservation, ce qui empêche la croissance microbienne et permet la croissance hors des chaîne du froids.

##### ▪ Techniques de sucrage

L'opération du sucrage est souvent effectuée :

- Par l'ajout des sucres aux fruits : cas des confitures ; ou aux jus de fruits, cas des gelées
- Par la déshydratation osmotique (déshydratation-imprégnation) effectuée par immersion des fruits dans des sirops. La déshydratation-imprégnation est une technique qui permet de diminuer l' $a_w$  du produit et d'augmenter la concentration en sucres.

On peut ajouter les sucres également à certains légumes en boîtes dont le but est de maintenir et conserver leur texture ; minimiser l'oxydation responsable de leur qualité organoleptique.

### ❖ **Autres additifs antimicrobiens**

- acides sorbiques et sorbates : ils ont un effet antifongique, et inhibent la croissance de certaines bactéries.
- oxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et sulfite de sodium : ils ont une action bactériostatique, mais ils peuvent poser des problèmes de santé (asthme, allergie) et destruction de la vitamine B<sub>1</sub>.

### **1.3.2. Les additifs antioxydants**

Ils ont pour rôle de limiter l'oxydation des nutriments tels que les lipides et les vitamines contenus dans les aliments afin de préserver à la fois les qualités organoleptique, nutritionnelle et hygiénique. Plusieurs types sont distingués :

- *Acide ascorbique (vitamine C) et ascorbates*

Ils limitent le rancissement et le brunissement sur les fruits et dans les produits laitiers.

- *Tocophérols (vitamine E)*
- *Acides gallique et ses sels*

Principalement gallates de propyle et d'octyle. Ils sont utilisés dans la conservation des corps gras industriels et des purées, mais ils peuvent provoquer des maladies de peau particulièrement l'eczéma.

- *Butylhydroxyanisol (BHA) et butylhydroxytoluène (BHT)*
- *Acides citrique, tartrique, phosphorique et lactique.*

## **2. Conservation des aliments sous atmosphère protectrice**

### **2.1. Définition**

La conservation sous atmosphère protectrice ou sous atmosphère modifiée, dite également atmosphère contrôlée, est une technique qui consiste à modifier la composition de l'atmosphère de l'emballage (contenant l'aliment) afin de prolonger sa durée de vie.

### **2.2. Principe de la technique**

Le principe de la technique vise à remplacer l'air entourant l'aliment (sous emballage) par un autre gaz. Le processus tend souvent à réduire le taux de l'oxygène entre 20 et 0% afin de ralentir :

- La croissance des formes de vie aérobie ;
- Les réactions d'oxydation enzymatiques et non enzymatiques.

L'oxygène enlevé peut être remplacé par d'autre gaz. Cependant, il existe des applications où l'enrichissement en oxygène est nécessaire pour agir comme inhibiteur (cas des framboises dont le métabolisme est bloqué avec 80% d'oxygène (inhibant la destruction cellulaire liée à la présence d'éthylène) ou encore en combinaison de l'oxygène et le dioxyde de carbone pour à la fois travailler l'aspect visuel (organoleptique) et sanitaire (viande, p.ex.).

### **2.3. Gaz utilisés**

La technique de la conservation protectrice fait appel à trois gaz principaux : l'azote, le dioxyde de carbone et l'oxygène. Il est également possible d'utiliser, de façon plus anecdotique l'hélium, l'argon et le protoxyde d'azote.

La proportion de gaz dans l'emballage doit représenter de l'ordre du tiers du volume, les deux tiers restants étant occupés par le produit.

#### ***L'azote***

Ce gaz est utilisé surtout pour remplacer l'oxygène dans l'emballage afin de réduire les phénomènes d'oxydation des pigments, des arômes et des matières grasses. L'azote est un gaz inerte, inodore et peu soluble dans l'eau ou les matières grasses, évitant ainsi toute rétraction de l'emballage. Il est également utilisé pour éviter l'écrasement de l'emballage.

#### ***Le dioxyde de carbone***

A haute concentration, le CO<sub>2</sub> est un agent bactériostatique et fongistatique. L'action inhibitrice de ce gaz est d'autant plus marquée que le conditionnement est appliqué immédiatement après la fabrication, lorsque les microorganismes se trouvent encore en phase de latence et que la charge microbienne est plus faible. Par ailleurs, l'effet inhibiteur du CO<sub>2</sub> augmente lorsque la température diminue en raison de sa meilleure solubilité dans la phase aqueuse du produit. Il est donc particulièrement recommandé de bien réfrigérer les produits conditionnés sous atmosphères enrichie en CO<sub>2</sub>.

De par sa solubilité dans l'eau et les graisses il peut parfois engendrer la rétraction de l'emballage.

### ***L'oxygène***

Souvent, l'oxygène est le gaz que l'on cherche à remplacer. Toutefois, il est utilisé comme composant du mélange gazeux dans certaines applications. C'est notamment le cas des viandes rouges dont la couleur ne peut être maintenue qu'en présence d'oxygène, ou encore du poisson de la mère pour éviter le développement de germes pathogène anaérobies de type *Clostridium*. Par ailleurs, il est indispensable à la respiration des végétaux.

### ***Autres gaz***

L'hélium est gaz léger absent de l'air que l'on peut intégrer dans le mélange afin de détecter des fuites.

L'argon possède des propriétés physiques intéressantes, il est :

- Parfaitement inerte ;
- Plus dense que l'azote, ce qui permet une meilleure efficacité de purge et des consommations en gaz inférieures ;
- Il inhibe fortement la respiration des végétaux.

Le protoxyde d'azote est un gaz utilisé pour le foisonnement des crèmes et des mousses. C'est un antagoniste de la sécrétion d'éthylène qui possède de plus un pouvoir cicatrisant sur le derme des fruits. Il a un effet bactériostatique et fongistatique. Cependant, il présente l'inconvénient d'être un gaz à effet de serre.

### **2.3.5. Mélange des gaz utilisés**

Différents mélanges de gaz sont utilisés

- Mélange naturel : obtenu grâce à l'action du processus physiologique de la cellule. Le mélange est composé de 79% de  $N_2$ , 11% de  $O_2$  et  $CO_2$ .
- Mélanges subnormaux, pour ces mélanges la somme des volumes d'oxygène et de carbone doit être inférieure à 21%. Les mélanges les plus répandus sont :  
3 à 5% d' $O_2$ , 3 à 5% de  $CO_2$  et 90 à 94% de  $N_2$ .

Le mélange de gaz dans le paquet dépend :

- Du type du produit ;
- Du matériau d'emballage
- De la température d'entreposage.

#### **2.4. Conservation des aliments respirant**

Les produits non respirant tels que les viandes, poissons, fromages... exigent des emballages à très faible perméabilité aux gaz, constitués de filme à haute barrière. Le mélange gazeux introduit ne doit pas varier dans l'emballage.

#### **2.5. Conservation des aliments non-respirant**

Les produits respirant tels (fruits et légumes) nécessitent un équilibre au niveau de la composition de l'atmosphère en adaptant la perméabilité de l'emballage à la respiration aux gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ). Ceci peut être réalisé par l'optimisation du choix de l'emballage (filme plastique). L'optimisation du système filme/aliment procédé par l'interaction de l'emballage (perméabilité) conduisant à un équilibre qui s'établit dans la composition de l'atmosphère, ce qui permet d'augmenter la durée de conservation de l'aliment.

D'autres facteurs peuvent influencer sur la durée de vie de l'aliment :

- La nature du produit ;
- La taille du produit ;
- Le niveau de préparation du produit
- La maturité du produit.

#### **2.6. Application de l'atmosphère modifiée**

Le choix de l'atmosphère modifiée pour un produit donné est étroitement lié à son  $a_w$ , qui détermine sa sensibilité aux divers agents d'altération. On peut donc répartir les applications du conditionnement sous atmosphère modifiée en fonction de trois catégories de produit alimentaires :

##### ***Produits secs ( $a_w < 0,4 - 0,5$ )***

Il s'agit des produits suivants : lait en poudre, légumes déshydratés, café, graines oléagineuses, fruits secs, etc. La durée de vie de ces produits est généralement limitée par des phénomènes d'oxydation et de rancissement de la matière grasse : l'azote, utilisé pour réduire la teneur en oxygène dans l'emballage, est donc couramment employé. L'argon peut également être choisi pour



une désoxygénation performante de l'atmosphère de l'emballage. La durée de vie de ces produits stockés à température ambiante peut ainsi être triplée ou quadruplée, sans utilisation d'antioxydants.

### ***Produits à humidité intermédiaire ( $0,4 < a_w < 0,8$ )***

On retrouve dans cette catégorie les produits à base de pâtes, biscuit, pâtisseries, etc. Leur conservation s'avère plus difficile car, outre les risques d'oxydation, il faut également prévenir dans ce cas les altérations enzymatiques et microbiennes. Pour ces produits, on utilise souvent du CO<sub>2</sub> pur ou des mélanges N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, avec un fort pourcentage de CO<sub>2</sub>.

### ***Produit humide ( $a_w > 0,8$ )***

Dans cette catégorie, le risque de développement des microorganismes est élevé. Le CO<sub>2</sub> est toujours nécessaire, toutefois, la composition du mélange dépend des produits et des exigences de l'utilisateur (type d'emballage, durée de vie, etc. de nombreux facteurs influent sur l'efficacité du conditionnement, le plus important d'entre eux demeurant la maîtrise de la température.

## **2.7. Avantages de la technique**

L'atmosphère modifiée est une technique qui a beaucoup d'avantages principalement :

- Son utilisation est sans ajout de conservateurs chimiques ;
- Elle maintient la fraîcheur initiale du produit ;
- Pas d'effet sur l'environnement.

## **3. Conservation des aliments par les hautes pressions**

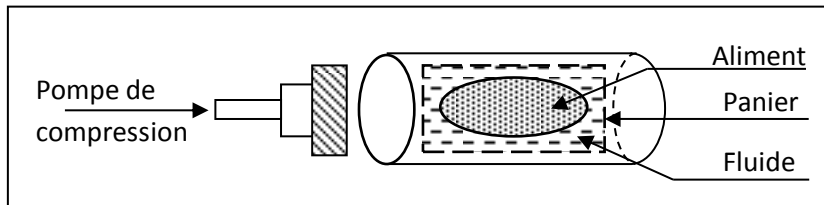
### **3.1. Définition et objectifs**

La stabilisation des aliments par les hautes pressions, encore appelée « pascalisation » ou « passurisation », est une technique qui consiste à pasteuriser les aliments en les soumettant à des fortes pressions de l'ordre de 6000 bars durant quelques minutes.

Cette technique est opérée à des températures ambiantes ou réfrigérées. Elle constitue donc une très bonne alternative aux traitements thermiques habituels, notamment ceux qui sont sensibles à la chaleur.

### 3.2. Principe de la technique

Dans une enceinte pleine de fluide (gaz :  $N_2$ ,  $CO_2$ , air ou liquide : eau) est placé l'aliment emballé par un emballage souple (déformable), souvent film en plastique pour subir une forte pression transmise par le fluide comprimé à l'aide d'une pompe de compression. La durée de compression est généralement de 3 à 5 min (figure 1).



**Figure 1** Principe de traitement des aliments par pascalisation

### 3.3. Types d'aliments traités par pascalisation

Les aliments que l'on peut traiter par pascalisation doivent être emballés dans un emballage souple pour permettre de transmettre la pression appliquée à son contenu. La technique traite particulièrement les aliments acides exceptés quelques aliments peu acides tels que le lait. Les aliments qui ne supportent pas la pression appliquée sont également exceptés : les fruits seront écrasés, car ils contiennent des poches d'air. Les aliments suivants peuvent être traités par pascalisation : jus de fruits ou de légumes, produit carnés, produit de la mère, plats cuisinés, confitures, yaourts ovo-produits, etc.

### 3.4. Effet de la pascalisation

#### 3.4.1. Sur les constituants alimentaires

L'effet de la pascalisation est exercé sur les macromolécules telles que les protéines et les lipides. Sur les micromolécules telles que les vitamines, l'effet étant négligeable.

#### 3.4.2. Sur les enzymes

Deux effets antagonistes peuvent apparaître :

**Effet positif :** la pression appliquée exerce une action suffisante permettant la désactivation des enzymes. Ceci est observé à des pressions supérieures à 100 MPa par la dénaturation des enzymes (protéines).

**Effet négatif :** cet effet est observé lorsque la pression appliquée entraîne une activation des enzymes : dans les cellules, les vacuoles ouvertes suite à l'effet de la pression exercée permet de mettre en contact les enzymes avec leurs substrats. Cela peut apparaître aux alentours de 100 MPa.

### 3.4.3. Sur les microorganismes

L'action de destruction sur les microorganismes est due à la modification des constituants cellulaires particulièrement :

Les protéines : elles subissent une dénaturation. Une pression de 200 MPa env. permet de modifier la structure tertiaire, au-delà de cette valeur, c'est la structure quaternaire qui sera modifiée.

Les lipides : la pascalisation entraîne une solidification des lipides.

La pascalisation peut affecter également les membranes cellulaires et engendrer des pertes de mouvements pour les microorganismes voués de se déplacer.

La pascalisation est capable de détruire la plupart des microorganismes, mais cela dépend :

- L'amplitude de la pression appliquée ;
- Du temps d'application ;
- Du pH du milieu ;
- Du type de microorganismes
- De la température de traitement.

La cinétique de destruction des microorganismes par la passurisation peut être exprimée par la relation suivante :

$$\frac{dN}{dt} = -K_p N \quad (1)$$

$$\text{Donc : } \log N = \log N_0 - \frac{t}{D_{10}} \quad (2)$$

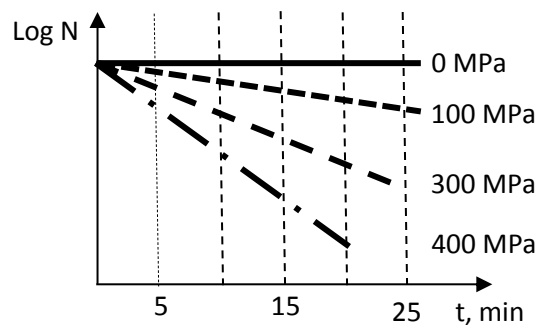
$N_0$  et  $N$  : nombre de microorganismes à  $t=0$  et  $t$  quelconque, respectivement,

$D_{10}$  : temps nécessaire, pour une pression donnée, pour réduire de 90% le nombre initial de microorganismes.

$$D_{10} = \frac{2,3}{K_p} \quad (3)$$

$K_p$  : constante de vitesse de réduction des microorganismes.

La figure 2 montre l'effet de la pascalisation sur les microorganismes à différentes pressions (en Méga pascals, MPa).



**Figure 2** Effet de la pascalisation sur les microorganismes.

En général, les microorganismes résistants à la température, sont également résistants à la pression :

- Les levures et les moisissures sont moins résistantes que les bactéries.
- Les formes sporulantes sont plus résistantes que les formes végétatives et les bactéries Gram + sont plus résistantes que les bactéries Gram -.

Les levures et les moisissures sont inactivées par des pressions variant de 200 à 300 MPa. La plupart des bactéries sous forme végétatives sont inactivées avec des pressions entre 400 et 600 MPa, par contre les spores bactériennes peuvent résister à des pressions supérieures à 1000 MPa.

### 3.5. Techniques de la pascalisation

La technique de la pascalisation peut être appliquée avec une compression directe ou indirecte :

#### 3.5.1. Système de compression directe

Dans ce système, la pression est générée directement à l'intérieure de l'enceinte par la compression d'un piston sur le liquide (fluide) en contact avec le produit. L'avantage de cette technique est

d'atteindre rapidement des pressions élevées, mais néanmoins elle reste limitée à des enceintes de faibles diamètres.

### **3.5.2. Système de compression indirecte**

La pression, dans ce cas est générée par une pompe 'haute pression' qui envoie le fluide dans une enceinte fermée. C'est la technique la plus répandue dans les industries.

### **3.6. Composition de l'équipement**

L'équipement est composé d'un cylindre résistant à la pression appliquée, d'un circuit de fluide 'haute pression', d'une pompe externe de compression du fluide, d'une unité de commande et d'un dispositif de chauffage ou de refroidissement.

### **3.7. Avantages de la pascalisation**

La technique de la pascalisation présente plusieurs avantages, les principales sont :

- La technique est une bonne alternative aux traitements thermiques surtout pour les produits sensibles à la chaleur ;
  - Elle maintient la fraîcheur naturelle du produit,
  - Elle maintient la qualité organoleptique : pas d'effet sur les composés aromatiques ;
  - et nutritionnelle : pas d'effet sur les nutriments fragiles (vitamines p.ex.) ;
- Application peu coûteux.

## **4. Conservation par fermentation**

La fermentation est la transformation des matières organiques induite par les ferments.

### **4.1. Types de fermentation**

Il existe différents types de fermentation, nous citons particulièrement la fermentation lactique, alcoolique et la fermentation acétique, toutefois, c'est la fermentation lactique qui est intéressante sur le plan alimentaire.

#### 4.1.1. Fermentation lactique

La fermentation lactique, dite aussi lactofermentation, est un mode de fermentation qui conduit à la production de l'acide lactique par la conversion de glucides sous l'effet des bactéries spécifiques appelées 'ferments lactiques'. Le milieu devient ainsi acide et permet l'élimination d'autres bactéries, éventuellement pathogènes.

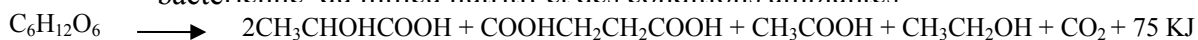
**Les bactéries lactiques** : appartenant aux genres lactobacillus et streptococcus, ces bactéries sont gram (+) et principalement anaérobies facultatives. Elles peuvent se développer à pH d'environ 4.

La fermentation lactique peut être :

- homo-fermentative, formant uniquement l'acide lactique :



- hétéro-fermentative, formant en plus de l'acide lactique d'autres produits qui dépendent de l'espèce bactérienne du milieu nutritif et des conditions ambiantes :



La quantité d'acide lactique varie de 1 à 3,5% selon l'espèce bactérienne.

**Utilisation pratique de la fermentation lactique** : en pratique, cette fermentation est sollicitée dans la préparation de nombreux produits alimentaires, particulièrement les produits lactés, la margarine, la panification, la choucroute (choux lactofermenté) et la production de l'acide lactique.

La fermentation est provoquée soit par les bactéries lactiques présentes dans l'aliment soit par une culture pure de ces bactéries. Pour la réussir on ajoute au produit le sel de cuisine sec (cas de choux) ou en solution à 7- 8% (cas de concombre) qui conduit à la plasmolyse des cellules par osmose ce qui permet au produit d'être enveloppé par le jus contenant le sucre, la substance à fermenter. En plus, le sel améliore la valeur dégustative et intervient comme conservateur.

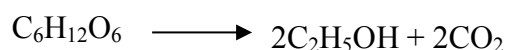
Le coupage des légumes conduit à l'écoulement du jus à la surface et la production, par fermentation, de plusieurs substances dont l'acide lactique et le CO<sub>2</sub>. Ceci inhibe les microorganismes et les enzymes (responsables du ramollissement des tissus) indésirables. Le CO<sub>2</sub> formé chasse l'air et conduit à des conditions anaérobies plus favorables à la protection de l'acide ascorbique et de la couleur naturelle du produit.

**Importance nutritionnelle :** l'importance nutritionnelle peut être résumée dans les points suivants :

- Augmentation de la digestibilité des protéines ;
- Dégradation des nitrates ;
- Inhibition du pouvoir antinutritionnel de certaines substances présentes surtout dans les légumineuses (acide phytique, les hémagglutinines...) ;
- Augmentation de la concentration en vitamines, surtout la vitamine B<sub>12</sub> qui serait multipliée par 30 ;
- Régénération de la flore intestinale formée en grande partie de bactéries lactiques qui
  - ✓ entretient l'acidité intestinale, évitant ainsi le développement des bactéries pathogènes ;
  - ✓ facilite l'assimilation des fibres en les dégradant ;
  - ✓ synthétise la vitamine K et celle du groupe B ;
  - ✓ synthétise des antibiotiques ;
  - ✓ purification de l'organisme en éliminant certains poisons comme les nitrosamines ;
  - ✓ formation de l'acide lactique qui a plusieurs effets thérapeutiques tels que :
    - il agit favorablement sur l'activité cardiaque et la respiration cellulaire ;
    - agit contre la constipation et les putréfactions intestinales
    - inhibe de nombreuses substances cancérogènes ;
    - protège le système sanguin en décomposant une grande partie du cholestérol alimentaire.

#### 4.1.2. Fermentation alcoolique

Cette fermentation a lieu grâce aux levures de vin existant dans la microflore épiphyte de la matière première ou par une culture pure. La réaction de la fermentation alcoolique est :



Les levures cessent leur activité lorsque la teneur en alcool devient supérieure ou égale à 16%. Contrairement à la fermentation lactique, la fermentation alcoolique n'est intéressante sur le nutritionnelle.

## Références bibliographiques

**Alais Charles, Miclo Larent, Linden Guy, 2008** Biochimie Alimentaire. *Ed. Dunod, V 1, Paris.*

**Bazinet Laurent, Castaigne François, 2011.** Concept de génie des procédés alimentaires: Procédés associés et application à la conservation des aliments. *Ed. Tec et Doc, Paris.*

**Binbinet Jean Jaque, charpentier Jean –Claude, 2002.** Génie des procédés alimentaires : des bases aux applications. *Ed. Dunode, Paris.*

**Cheftel Jean-Claude, Cheftel Henri, 1992.** Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. *Ed. Tec et Doc, V1, Paris.*

**Cheftel Jean-Claude, Cheftel Henri, 1992.** Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. *Ed. Tec et Doc, V2, Paris.*

**Guiraud Joseph-Pierre, 1998.** La microbiologie alimentaire. *Ed. Dunod, Paris.*

**Jeantet Romain, Crogunec Thomas, Schuck Pierr, Brulé Gerard, 2007.** Science des aliments : biochimie microbiologie, procédés, produits. *Ed. Lavoisier, V1, Paris.*

**Jeantet Romain, Crogunec Thomas, Schuck Pierr, Brulé Gerard, 2007.** Science des aliments : biochimie microbiologie, procédés, produits. *Ed. Lavoisier, V2, Paris.*

**Mich Jean-Claude, 1974.** Composition des aliments : Composition, qualité biodégradation. *Ed. PUF, Paris.*