

L'aliment est un besoin fondamental pour la vie ! L'agriculture, l'élevage et la pêche fournissent à l'homme une variété de produits qui doivent être conservés pour être consommés sur une plus longue période. Le développement des méthodes de conservation a contribué à la production d'aliments au niveau mondial, au point qu'aujourd'hui, on estime que la production alimentaire mondiale est suffisante pour nourrir toute l'humanité. Cependant, il existe de grandes disparités en matière de disponibilité alimentaire, en particulier en Afrique au Sud du Sahara où la précarité alimentaire, l'augmentation galopante de la population et l'urbanisation effrénée font craindre le pire pour le futur.

Différentes stratégies ont été mises en œuvre pour remédier à cette situation, notamment l'augmentation de la production agricole à travers des paquets technologiques plus productifs. Cependant, la sécurité alimentaire ne peut être garantie uniquement par l'augmentation de la production. Les efforts consentis peuvent donc être annihilés si l'accent n'est pas également mis sur la réduction des pertes post-récolte de manière à s'assurer qu'à terme, l'intégralité de la production se retrouve sur la table des consommateurs, à l'état frais ou transformé.

La transformation et la conservation des produits alimentaires nécessitent des opérations destinées à leur assurer une bonne qualité en les rendant attractifs, comestibles, délicieux et nutritifs pour le consommateur. Le stockage, la distribution et le commerce des aliments nécessitent que ceux-ci aient une durée de vie commerciale relativement longue et soient d'une bonne innocuité pour les consommateurs. La qualité de l'aliment s'apprécie à travers tous ces facteurs. Par conséquent, elle est essentielle aussi bien pour le producteur que pour le consommateur.

Il est alors important de développer des savoir-faire technologiques et des infrastructures adéquats pour satisfaire la demande d'aliments de bonne qualité. Dans le contexte du continent africain qui doit aujourd'hui, plus que par le passé, faire face à une crise d'identité culturelle alimentaire, du fait de la mondialisation, cette nécessité de développement technologique revêt une importance toute particulière.

Ce livre aborde les bases théoriques, les principes, les applications pratiques des opérations unitaires de transformation alimentaire, les méthodes d'optimisation et de conservation, d'analyse et de maîtrise de la qualité. Il aborde également les questions liées à certaines technologies comme celles des céréales, des racines et tubercules, des fruits et légumes, etc., spécifiques au contexte africain.

Ce livre est une source essentielle de connaissance et d'exercices pour les étudiants en science et technologie des aliments au niveau des universités et des écoles de formation professionnelle. Sa conception sous forme compacte et intégrée de type « tout en un » en fera une référence indispensable pour les professionnels de l'agroalimentaire.

LES ALIMENTS Transformation, Conservation et Qualité
Nout, Hounhouigan, van Boekel

LES ALIMENTS



Transformation, Conservation et Qualité

Par
Robert Nout
Joseph D. Hounhouigan
Tiny van Boekel

Backhuys Publishers

ISBN 90-5782-124-9



LES ALIMENTS

Transformation, Conservation et Qualité

Par
Robert Nout
Joseph D. Hounhouigan
Tiny van Boekel

Photos de page de couverture:

En haut à gauche: Conditionnement de concentré de jus de passiflore à l'échelle industrielle (Photo: Robert Nout)

En haut à droite: Opération de garification (cuisson du gari) sur un foyer amélioré (Photo: Joseph Hounhouigan)

En bas à droite: Plat de crêpe à base de farine d'igname, de manioc et d'oeuf (Photo: Joseph Hounhouigan)

Conception et rédaction:

Joseph D. HOUNHOUIGAN , Dr.ir.

Maître de Conférence

Biochimie & Technologie Alimentaires

Faculté des Sciences Agronomiques

Université d' Abomey-Calavi

République du Bénin

Robert NOUT , Dr.ir.

Professeur Associé

Microbiologie Alimentaire

Université de Wageningen

Pays-Bas

Tiny VAN BOEKEL, Dr.ir.

Professeur

Conception de Produit & Gestion de Qualité

Université de Wageningen

Pays-Bas

Produced by Margraf Publishers GmbH

© 2003 Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands

Co-publication with „Le Centre technique de coopération agricole et rurale“ (CTA), Wageningen, The Netherlands

All rights reserved. No part of this book may be translated or reproduced in any form by print, photoprint, microfilm, or any other means without prior written permission from the publishers, Backhuys Publishers, P.O. Box 321, 2300 AH Leiden, The Netherlands.

Printed in Germany

ISBN 90-5782-124-9



Le Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA) a été créé en 1983 dans le cadre de la Convention de Lomé entre les pays ACP (Pays d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique) et les États membres de l'Union européenne. Depuis 2000, il exerce ses activités dans le cadre de l'Accord de Cotonou ACP-CE.

Le CTA a pour mission de développer et de fournir des services visant à améliorer l'accès à l'information en faveur du développement agricole et rural. Il cherche également à renforcer la capacité des pays ACP à produire, acquérir, échanger et utiliser des informations dans ce domaine. Les programmes du CTA s'articulent autour de quatre thèmes principaux :

- améliorer la gestion de l'information et élaborer des stratégies de partenariat en vue de formuler et de mettre en œuvre des politiques de développement ;
- promouvoir les contacts et l'échange d'expériences ;
- fournir aux partenaires ACP des informations à leur demande ;
- et renforcer leurs capacités à acquérir des informations et à les communiquer.

CTA, Postbus 380, 6700 AJ Wageningen, Pays-Bas

TABLE DES MATIÈRES

Préface

Liste des symboles

1. Composants principaux et propriétés des aliments	1
1.1. Introduction	1
1.2. Les composants chimiques et leur importance technologique	3
1.3. Tables de composition	9
2. Quelques facteurs de détérioration des aliments	15
2.1. Les micro-organismes et leur comportement	15
2.2. Les altérations d'origine microbienne: maladies et détérioration	21
2.3. Les altérations d'origine chimique et biochimique	32
2.4. Les arthropodes	43
2.5. Les rongeurs	48
2.6. La détérioration et la conservation	50
3. Génie des procédés	53
3.1. Les procédés et les opérations unitaires	53
3.2. Le transfert de matière	54
3.3. Le transfert de chaleur	57
3.4. Le mélange	61
3.5. La séparation	63
3.6. La réduction de taille	70
3.7. L'emballage des aliments	74
4. Aspects de conservation	85
4.1. Les aspects de cinétique	85
4.2. La conservation par la chaleur	90
4.3. La conservation par le froid	108
4.4. La conservation à sec	119
4.5. La conservation par l'addition de produits chimiques	132
4.6. La conservation à l'aide de micro-organismes	136
4.7. La conservation par la radiation ionisante	138
5. Aspects de qualité	141
5.1. La qualité des aliments: généralités	141
5.2. La qualité physique: texture, propriétés colloïdales, rhéologie	144
5.3. La qualité organoleptique	165
5.4. Les conséquences nutritionnelles des traitements culinaires	171
5.5. L'analyse et la maîtrise de la qualité des aliments	185

6. Technologie des produits	193
Produits d'origine végétale	193
6.1. Les céréales	193
6.2. La rizerie	206
6.3. Les racines et tubercules	211
6.4. Les produits oléagineux	216
6.5. Les fruits et légumes	225
6.6. La sucrerie	231
6.7. Les boissons alcoolisées	237
Produits d'origine animale	239
6.8. La viande et le poisson	239
6.9. Les produits laitiers	243
Bibliographie	251
Lexique terminologique	257
Remerciements	262
Index	263

Préface

L'aliment est un besoin fondamental pour la vie ! L'agriculture, l'élevage et la pêche fournissent à l'homme une variété de produits qui doivent être conservés pour être consommés sur une plus longue période. Le développement des méthodes de conservation a contribué à la production d'aliments au niveau mondial, au point qu'aujourd'hui, on estime que la production alimentaire mondiale est suffisante pour nourrir toute l'humanité. Cependant, il existe de grandes disparités en matière de disponibilité alimentaire, en particulier en Afrique au Sud du Sahara où la précarité alimentaire, l'augmentation galopante de la population et l'urbanisation effrénée font craindre le pire pour le futur.

Différentes stratégies ont été mises en œuvre pour remédier à cette situation, notamment l'augmentation de la production agricole à travers des paquets technologiques plus productifs. Cependant, la sécurité alimentaire ne peut être garantie uniquement par l'augmentation de la production. Les efforts consentis peuvent donc être annihilés si l'accent n'est pas également mis sur la réduction des pertes post-récolte de manière à s'assurer qu'à terme, l'intégralité de la production se retrouve sur la table des consommateurs, à l'état frais ou transformé.

La transformation et la conservation des produits alimentaires nécessitent des opérations destinées à leur assurer une bonne qualité en les rendant attractifs, comestibles, délicieux et nutritifs pour le consommateur. Le stockage, la distribution et le commerce des aliments nécessitent que ceux-ci aient une durée de vie commerciale relativement longue et soient d'une bonne innocuité pour les consommateurs. La qualité de l'aliment s'apprécie à travers tous ces facteurs. Par conséquent, elle est essentielle aussi bien pour le producteur que pour le consommateur.

Il est alors important de développer des savoir-faire technologiques et des infrastructures adéquats pour satisfaire la demande d'aliments de bonne qualité. Dans le contexte du continent africain qui doit aujourd'hui, plus que par le passé, faire face à une crise d'identité culturelle alimentaire, du fait de la mondialisation, cette nécessité de développement technologique revêt une importance toute particulière.

Ce livre aborde les bases théoriques, les principes, les applications pratiques des opérations unitaires de transformation alimentaire, les méthodes d'optimisation et de conservation, d'analyse et de maîtrise de la qualité. Il aborde également les questions liées à certaines technologies comme celles des céréales, des racines et tubercules, des fruits et légumes, etc., spécifiques au contexte africain.

Ce livre est une source essentielle de connaissance et d'exercices pour les étudiants en science et technologie des aliments au niveau des universités et des écoles de formation professionnelle. Sa conception sous forme compacte et intégrée de type « tout en un » en fera une référence indispensable pour les professionnels de l'agroalimentaire.

LISTE DES SYMBOLES

a_w	activité de l'eau (-)
A	la constante de Hamaker (J)
c	concentration (mol.l ⁻¹)
c_{ch}	capacité de chaleur
c_s	chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
CV	coefficient de variation (-)
d	distance (m)
D	temps de réduction décimale (min)
d_{ch}	chaleur de congélation (J.kg ⁻¹)
D_f	diffusivité (m ² s ⁻¹)
E_a	l'énergie d'activation (J.mol ⁻¹)
F	temps de léthalité (min)
F_f	force frictionnelle (N)
F_g	force gravitationnelle (N)
g	accélération de gravité (m ² s ⁻¹)
G	module de rigidité (N m ⁻²)
G_1	gradient de vitesse d'écoulement laminaire (s ⁻¹)
h	distance (m)
H	longueur (m)
J_B	nombre de rencontres dues au mouvement Brownien (s ⁻¹)
J_G	nombre de rencontres dues au mouvement laminaire (s ⁻¹)
k	constante de vitesse d'une réaction (mol l ⁻¹) ¹⁻ⁿ s ⁻¹)
k_B	constante de Boltzmann (1.38×10 ⁻²³ J K ⁻¹)
k_c	transfert de la chaleur (W.m ⁻² .K ⁻¹)
k_0	facteur pré-exponentiel (loi d'Arrhenius)
k_s	constante de la loi de Fechner (-)
LR	liquides réfrigérants
m	masse (kg)
MR	machines réfrigérantes
n	ordre d'une réaction
N	nombre
n_D	réduction décimale (-)
n_N	nombre de répétitions (-)
O	l'aire, superficie (m ²)
P	pression de vapeur (Pa)
Q	quantité de chaleur (J)
Q_{10}	k_{T+10}/k_T (-)
r	rayon d'une particule (m)
R	constante de gaz parfait (8.314 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
r_d	nombre de dédoublement par unité de temps (s ⁻¹)
s	l'écart-type
S	intensité de stimulation (loi de Fechner)
t	la valeur t (statistique)
t	temps (s)
T	température (K, ou °C)
t^*	temps de référence (s)

T^*	température de référence (K, ou °C)
t_g	le temps de génération microbiologique (s)
V	vitesse d'écoulement ($m\ s^{-1}$)
V_A	l'énergie d'attraction (J)
V_R	l'énergie de répulsion (J)
z	la valeur z (°C)
z_i	valence de l'électrolyte i

Symboles grecs

ε	constante diélectrique
ε_l	déformation relative (-)
γ	déformation relative (-)
η	viscosité (Pa s, Ns m^{-2})
η_E	viscosité de traction (Pa s, Ns m^{-2})
$1/\kappa$	distance caractéristique colloïdale (nm)
λ	puissance de conductibilité ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
μ	taux de croissance
v	vitesse d'une réaction
ρ	densité ($kg\ m^{-3}$)
σ	contrainte de cisaillement ($N\ m^{-2}$)
σ_0	contrainte de seuil ($N\ m^{-2}$)
Ψ_d	la charge électrique (V)

COMPOSANTS PRINCIPAUX ET PROPRIÉTÉS DES ALIMENTS

1.1 Introduction

La science alimentaire se définit comme une combinaison des sciences fondamentales et des sciences appliquées s'occupant des diverses étapes comprises entre la production primaire des aliments végétaux et animaux et la consommation des produits finis.

L'homme a fait depuis très longtemps de nombreux efforts pour conserver ses produits agricoles. Par exemple, la bière Babylonienne date de 7000 avant J.C., et les Romains avaient des abattoirs en l'an 100 après J.C. Tout au long de son histoire, l'homme a été confronté à la nécessité de disposer de ressources alimentaires sous forme de réserves. On distingue cinq motivations :

- D'abord sa préoccupation est de garantir sa survie pendant la période annuelle où la production agricole n'est pratiquement pas possible (la saison sèche en pays tropicaux et subtropicaux, la saison froide en pays tempérés). Ce sont en premier lieu ses aliments de base que tout groupe humain a cherché à conserver : les céréales, les légumineuses, les racines et tubercules, ainsi que les viandes et les poissons.
- En second lieu, l'homme a toujours cherché à disposer d'aliments variés, autant par nécessité biologique que par plaisir et aussi pour des raisons de sécurité : en étendant la gamme de produits comestibles, les populations réduisent leur dépendance et de ce fait le risque de famine.
- Tous les aliments récoltés à certaines saisons (par exemple les fruits) ou de façon périodique (produits de pêche ou de chasse) ont donné lieu à la mise au point de techniques de conservation en vue de leur stockage. Exemples : séchage à l'air libre ou à l'abri des oiseaux et insectes, fermentation, salage, fumage,..... Le souci de conserver la viande, en particulier le

gros gibier obtenu par la chasse collective et le poisson pour les consommer plus tard ou les exporter vers d'autres régions, est depuis des siècles une préoccupation de bien des peuples.

- Par ailleurs, l'homme a peu à peu élaboré des méthodes de préparation qui rendent l'aliment consommable, plus digestible ou de meilleur goût. Il a ainsi pu utiliser des espèces ou variétés inconsommables en l'état en faisant disparaître les composés toxiques : par exemple les variétés amères de manioc dont l'acide cyanhydrique est éliminé par rouissage, la pomme de terre dont les alcaloïdes sont détruits au cours du trempage associé à une fermentation. Les différents modes de cuisson mis au point par l'homme permettent parfois une augmentation de la digestibilité par la gélatinisation de l'amidon ou la dénaturation des protéines.
- La saveur, la texture et l'appétence des aliments sont aussi le plus souvent améliorées par la cuisson et on peut constater que tous les groupes humains connus pratiquent la cuisson sur le feu.

Le début du développement de la science alimentaire était stimulé par la nécessité de conserver les aliments. En 1810, Nicolas Appert a décrit la conservation des aliments dans des bocaux en verre à l'aide de la chaleur. Beaucoup plus tard en 1860, c'était Louis Pasteur qui a découvert un nombre d'espèces de micro-organismes et leur importance par rapport à la détérioration et la fermentation des aliments. Le développement de nouveaux produits industriels a commencé par Mège Mouriés en 1869 avec l'invention de la margarine comme substitut économique du beurre.

L'étude des micro-organismes a été facilité par l'invention de la coloration de Gram par le Prof. Gram (1884) et le développement des techniques stériles par Robert Koch.

On peut positionner la science alimentaire au centre de nombreuses sciences fondamentales et appliquées, tout comme un système solaire dont la science alimentaire représenterait le centre.

Ce livre traite des aliments, leur transformation, conservation et qualité. Par ordre de présentation la composition des aliments et leurs ingrédients primaires seront traités dans la chapitre 1, suivie dans la chapitre 2 par les facteurs de détérioration. Avant la discussion sur la conservation (chapitre 4), on traitera de quelques méthodes de transformation (chapitre 3). Tout au long de la chaîne de production depuis la matière première jusqu'au produit fini, la qualité des produits et la sécurité hygiénique sont essentielles. On abordera les aspects de qualité dans la chapitre 5. Dans le contexte tropical, quelques exemples des procédés de transformation de produits spécifiques seront discutés dans la chapitre 6. Un certain nombre de livres plus spécialisés sont présentés dans la bibliographie. Enfin, le lexique terminologique présente, par ordre alphabétique, quelques termes et notions importantes.

1.2 Les composants chimiques et leur importance technologique

1.2.1 L'eau

La teneur en eau des produits alimentaires joue un rôle déterminant durant leur conservation. En effet, les micro-organismes ne peuvent pas se multiplier en absence d'eau. La teneur en eau disponible est un facteur primordial ; il représente l'activité (chimique) de l'eau, ou a_w . On peut déterminer l'activité de l'eau a_w par la formule suivante :

$$a_w = \frac{P_{H_2O \text{ aliment}}}{P_{H_2O \text{ pure}}} \quad (1.1)$$

dans laquelle P signifie la pression de vapeur. La définition pour les solutions idéales est :

$$a_w = \frac{\text{nombre de moles de l'eau}}{\text{nombre de moles de l'eau} + \text{nombre de moles des substances en solution}} \quad (1.2)$$

L'activité de l'eau (a_w) de certains aliments est présenté au tableau 1.2.1.

En effet, une partie de l'eau contenue dans le produit alimentaire n'est pas disponible pour des réactions. En réduisant la teneur en eau disponible, c'est-à-dire en abaissant son a_w , on améliore la stabilité microbienne du produit. Pour ce faire, on peut procéder de deux façons : soit éliminer une partie de l'eau libre par séchage ou déshydratation ou concentration, soit augmenter la teneur en solutés en ajoutant du sel, du sucre, etc. (cf. l'équation 1.2).

Par ailleurs, il faut remarquer que la teneur en eau d'un aliment (%) et l'activité de l'eau du même aliment ne sont pas liées directement, comme l'illustre le tableau 1.2.2.

a_w	aliments
1	eau
0,99	fruits, légumes, lait
0,95	pain, viandes
0,94	fromages
0,90	jambon
0,85	charcuterie, fromages secs
0,80	gâteaux, confitures
0,75	poisson salé
0,70	céréales sèches
0,65	fruits secs
0,12	lait en poudre

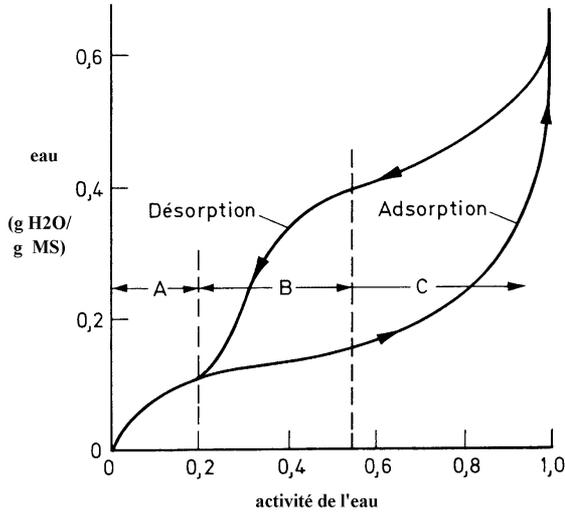
Tableau 1.2.1
 a_w de certains
aliments

produit	teneur en eau (%)	activité de l'eau (a_w)
lait	87	0,994
viande fraîche	65	0,985
fruits frais	90	0,97
pain	40	0,96
confiture	35	0,86
margarine	16	0,99
farine de blé	15	0,75
macaroni	10	0,45
lait en poudre	3	0,12

Tableau 1.2.2
La teneur en eau et
l'activité de l'eau de
certains aliments

Dans la figure 1.2.1 une isotherme de sorption est donnée pour un aliment ayant une faible teneur en eau.

Figure 1.2.1
Isotherme de sorption d'un produit avec une faible teneur en eau



Les courbes d'adsorption et de désorption (processus de séchage) ne suivent pas la même allure; ce phénomène est appelé "hystérésis". Pendant le séchage les capillaires se ferment, pour les re-ouvrir, il faut une pression partielle de l'eau plus élevée.

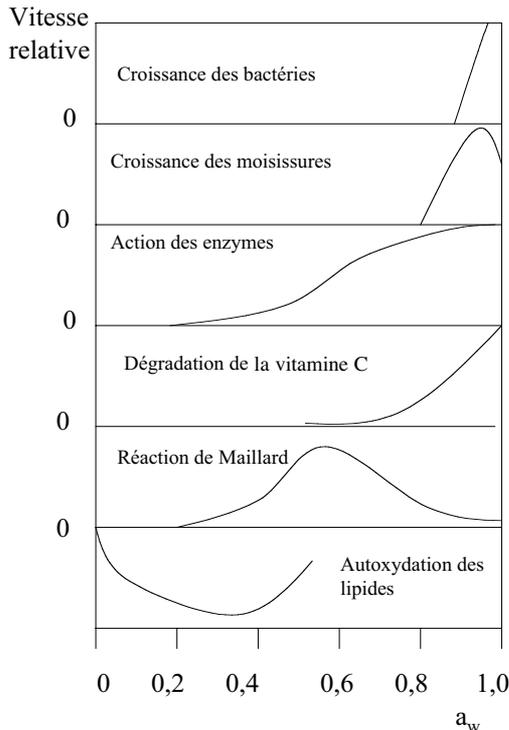
On distingue trois régions de comportement de l'eau dans les courbes de sorption.

Pendant l'adsorption d'humidité, la surface du produit est couverte par une couche monomoléculaire (Région A: l'eau liée). La région B correspond à l'eau nécessaire pour former une échelle d'hydratation. L'eau de la région C se met dans les capillaires ou est libre.

Généralement l'eau est mobile sauf dans la région A.

Dans la figure 1.2.2 on peut voir l'influence de l'activité de l'eau sur quelques réactions d'importance pour la détérioration des aliments.

Figure 1.2.2
L'influence de l'activité de l'eau sur quelques réactions dans les aliments



1.2.2 Les Protides

Les protides sont des polymères composés de divers acides aminés. Les acides aminés (Fig. 1.2.3) sont couplés par des liaisons peptidiques, en formant des polypeptides. Les acides aminés les plus importants sont présentés au tableau 1.2.3.

Les protides se trouvent dans la plupart des aliments en taux très divers. Dans les produits d'origine végétale, les protides se

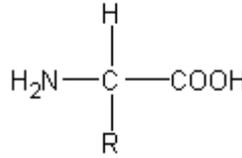


Figure 1.2.3

Formule générale des acides aminés

Alanine (Ala)	Arginine (Arg)	Asparagine (Asn)	Acide Aspartique (Asp)
Cystéine (Cys)	Glutamine (Gln)	Acide glutamique (Glu)	Glycine (Gly)
Histidine (His)	Isoleucine (Ileu)	Leucine (Leu)	Lysine (Lys)
Méthionine (Met)	Phénylalanine (Phe)	Proline (Pro)	Serine (Ser)
Thréonine (Thr)	Tryptophane (Trp)	Tyrosine (Tyr)	Valine (Val)

Tableau 1.2.3

Les acides aminés

présentent comme une source de nutriments de réserve dans le cytoplasme des cellules. Dans les viandes et les poissons, on trouve les protides surtout dans les muscles. Du point de vue de la nutrition humaine, les protides sont une source essentielle d'acides aminés. Le tableau 1.2.4 donne la teneur en protides de quelques aliments.

Poisson sec	45,0	Haricots	22,0
Poisson frais	19,0	Mil	11,0
Viande	17,0	Riz	8,0
Lait	3,5	Manioc	1,5
Arachide	27,0		

Tableau 1.2.4

La teneur en
protides de
quelques aliments
(% poids frais)

Quelques propriétés des protides d'importance dans le cadre de la transformation sont :

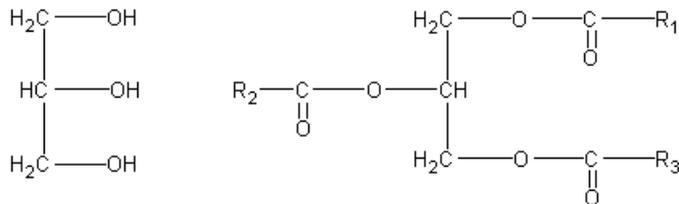
- Solubilité dans l'eau : elle est influencée par la salinité et le pH. En principe, la solubilité augmente la valeur nutritive. En addition, les protides solubilisés influencent le comportement physico-chimique des aliments.
- Coagulation : elle est provoquée par la chaleur (dénaturation), la salinité et la présence de diverses enzymes. La coagulation est d'importance par exemple pour la fabrication du fromage qui est constituée de caséine coagulée.
- Décomposition par hydrolyse : quand les protides sont hydrolysés, les peptides et les acides aminés formés auront une plus forte solubilité dans l'eau. Ceci augmente la valeur nutritive et la saveur des produits peut être améliorée par certains acides aminés libres.
- Les réactions de Maillard se réalisent entre les groupes aminés des protides, peptides, acides aminés, et les sucres réducteurs. L'importance de ces réactions est la formation des substances de couleur et de goût, mais aussi la perte de valeur nutritive.

Il est également recommandé de consulter le lexique terminologique.

1.2.3 Les lipides

Du point de vue chimique, la plupart des lipides sont des glycérides des acides gras. Les glycérides se présentent souvent comme des triglycérides (Figure 1.2.4). Les lipides sont importants dans la nutrition comme une source d'énergie et d'acides gras essentiels. Il y a des acides gras insaturés et des acides gras saturés. Les acides gras insaturés sont sensibles à l'oxydation. Le taux des lipides peut varier; par exemple le manioc est très pauvre (1-2%) en lipides, tandis que les arachides contiennent environ 45% de leur poids sous forme d'huile.

Figure 1.2.4
Formules du
glycérol et d'un
triglycéride



Quelques propriétés générales des lipides d'importance sont :

- Qu'elles sont hydrophobes (non-miscibles avec l'eau), et ont la capacité de former des émulsions avec la phase aqueuse;
- On peut extraire les lipides des aliments en utilisant des solvants organiques; les lipides eux-mêmes sont des solvants pour certaines vitamines;
- Leur poids spécifique est inférieur au P.S. de l'eau, causant la flottation des lipides à la surface de l'eau (par exemple l'écémage du lait est causé par la différence de poids spécifique);

- Leur point de fusion dépend de la composition des acides gras présents dans les glycérides : le point de fusion est d'autant plus bas que la chaîne de carbone des acides gras est plus courte. Mais surtout, le point de fusion est d'autant plus bas qu'il y a de liaisons insaturées par acide gras. Cette relation est montrée dans le Tableau 1.2.5.

acide gras	formule : C H COOH	nombre de liaisons insaturées	point de fusion (°C)
	↓ ↓		
stéarique	17 35	0	+69
oléique	17 33	1	+14
linoléique	17 31	2	-5
linoléinique	17 29	3	-11

Tableau 1.2.5
Relation entre le point de fusion et le nombre de liaisons insaturées des triglycérides

En addition des lipides il y a d'autres matières grasses comme par exemple la lécithine, qui est un phospholipide. La lécithine a une grande importance technologique; elle est utilisée comme produit de stabilisation des émulsions.

La détérioration des matières grasses peut avoir lieu de 2 manières :

- Par l'hydrolyse causée par des enzymes (lipases) : les acides gras libres formés sont assez volatiles et causent une odeur de rancidité,
- Par oxydation catalysée par des enzymes (par exemple les lipoxygénases) ou des traces de métaux (par exemple Cu, Fe); les cétones et les aldéhydes formés causent une odeur piquante. On peut éviter ou freiner l'oxydation par l'addition des produits antioxydants. Ce thème est traité dans le chapitre 2.

1.2.4 Les saccharides

Les saccharides sont très répandus dans les produits d'origine végétale; les produits d'origine animale contiennent de faibles taux de saccharides.

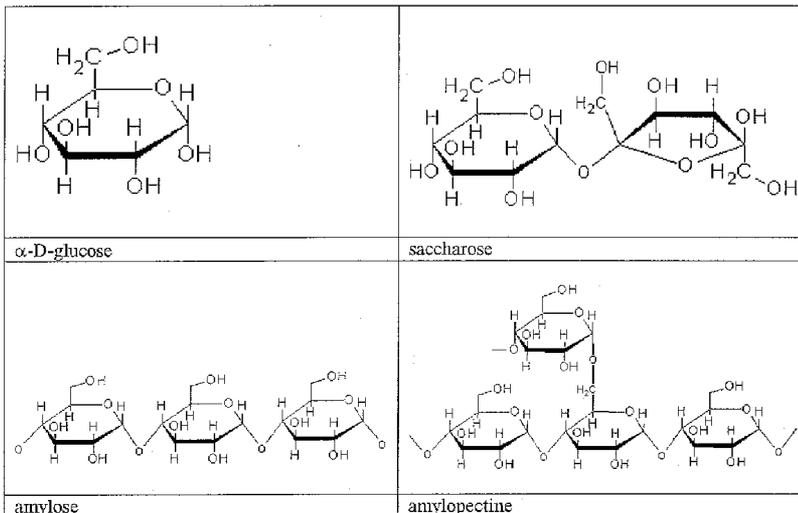


Figure 1.2.5
Structures de base de quelques saccharides

Du point de vue chimique, les saccharides sont composés de C, H et O. Les unités les plus petites sont les monosaccharides, dont les plus importants sont le glucose, le galactose, et le fructose. La figure 1.2.5 présente quelques exemples. Couplés, 2 monosaccharides constituent un disaccharide. Les disaccharides les plus importants sont le saccharose, le lactose et le maltose. Ainsi, on connaît les trisaccharides, les tétrasaccharides, etc.

Les molécules les plus grandes sont les polysaccharides contenant quelques centaines d'unités de monosaccharides. Les polysaccharides les plus importants sont l'amidon (dont l'amylose et l'amylopectine), le glycogène, la cellulose, l'agar-agar, les gommés et les matières pectineuses.

Du point de vue technologique, l'importance des saccharides est énorme. Comme les polysaccharides ont leurs fonctions de fibres (par exemple la cellulose et les matières pectineuses) qui donnent la fermeté aux tissus végétaux, leur décomposition changera la texture des produits. En plus, l'amidon et le glycogène ont une fonction de réserve de saccharides. L'amidon peut être gélatinisé par la chaleur en présence de l'eau. L'amidon est une nourriture très importante pour les populations du monde entier. L'amidon peut être décomposé par l'action des enzymes pour la fabrication de maltose et de glucose, que l'on peut transformer en plusieurs produits importants.

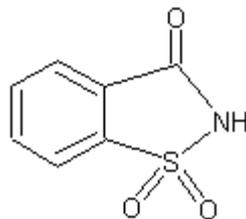
Les di- et monosaccharides ont des propriétés très importantes qui déterminent la qualité des produits alimentaires. Par exemple, ils ont un goût sucré. Ce pouvoir édulcorant varie selon les saccharides, comme l'illustre le tableau 1.2.6.

En plus, les saccharides sont caramélisés en présence de la chaleur et de l'acide. Cette réaction influence la couleur et le goût. Ensuite, les saccharides peuvent être fermentés par les microorganismes. La fermentation peut être indésirable dans certains cas : on la considère comme une détérioration. Mais on connaît aussi des fermentations désirables (la fermentation alcoolique du vin, de la bière et du dolo, la fermentation lactique du yaourt et du fromage) pour lesquelles le glucose, le maltose et le lactose sont des ingrédients indispensables.

Tableau 1.2.6
Goût sucré relatif à
chaque substance

saccharine	550,00
fructose	1,15
saccharose	1,00
glucose	0,65
galactose	0,60
maltose	0,46
lactose	0,30

Figure 1.2.6
Formule de la
saccharine



Autres produits édulcorants :

Pour les applications diététiques on utilise des produits édulcorants de base non-saccharide parce qu'ils ne représentent pas d'énergie métabolisable. Quelques exemples de ces produits sont la saccharine et la thaumatine.

La saccharine (acide benzoïque-o-sulfamide; Figure 1.2.6) est très utilisée dans les régimes diabétiques.

La thaumatine est un protide/peptide d'origine végétale, que l'on peut produire aussi par voie biotechnologique.

1.2.5 Les Minéraux

Les minéraux se trouvent soit sous la forme inorganique comme des sels (par exemple dans l'eau potable et dans le lait), soit sous la forme organique comme constituants de complexes organiques (par exemple le magnésium se trouve dans la chlorophylle, le fer dans l'hémoglobine, le cuivre dans le sang des mollusques, le phosphore dans le phytate, le soufre dans quelques acides aminés, le calcium et le phosphate dans la caséine.)

1.2.6 Les Vitamines

Les vitamines sont des micro-nutriments indispensables pour le métabolisme humain. On les distingue par leur solubilité soit dans l'eau (la vitamine C, et celles du complexe-B), soit dans les lipides (les vitamines A, D, E, et K). En général, les vitamines sont sensibles à la chaleur, à l'oxydation et à la lumière.

1.2.7 Les Enzymes

La plupart des aliments frais d'origine végétale ou animale contiennent une multitude d'enzymes. Ce sont des protides que l'on peut définir comme biocatalyseurs des réactions du métabolisme. Les enzymes ont une action spécifique. Souvent, ils sont thermolabiles. Quelques exemples sont les amylases (décomposant l'amidon), les protéinases (décomposant les protides), les lipases (décomposant les lipides), et les oxydases (catalysant les réactions d'oxydation).

1.2.8 Divers Composants

Selon l'origine du produit, il y a une multitude de composants chimiques qui se présentent à des taux faibles mais qui peuvent donner des propriétés caractéristiques. Quelques exemples sont les acides organiques, les colorants, les huiles essentielles et les composants d'odeur et de la saveur.

1.3 Tables de composition

Du point de vue de la nutrition, la connaissance de la composition des aliments et leurs ingrédients est très importante. On fait la distinction entre les macro-nutriments et les micro-nutriments.

Les macro-nutriments comprennent les protéines, les lipides et les saccharides ou glucides, tandis que les micro-nutriments sont les sels minéraux, les vitamines et d'autres composants de teneur faible mais importants pour la santé du consommateur.

Du point de vue de la technologie des transformations, la connaissance de la composition est essentielle pour mieux ajuster les conditions de transformation aux sensibilités des composants. Par exemple, plusieurs vitamines sont perdues aisément par des traitements à l'eau, ou par chauffage.

La documentation professionnelle fournit des « tables de composition » qui offrent l'information sur les macro- et micro-nutriments. Dans ces tables, les aliments sont groupés selon leur origine (les céréales, les fruits, les poissons, etc.).

En général on distingue la « composition approximative » qui spécifie les pourcentages d'eau, de protéines, de saccharides, et les

Composition pour 100g de portion consommable

No.	Nom	Nom scientifique	Eau %	Energie (kJ)	Protéines (g)	Lipides (g)	Saccharides (g)	Cendres (g)
Céréales								
1	Maïs, blanc, sec	<i>Zea mays</i>	10	1722	10.7	4.1	83	3.1
2	Petit Mil, graines	<i>Pennisetum typhoides</i>	11	1731	9.0	5.0	83	2.1
3	Sorgho, graines	<i>Sorghum bicolor</i>	12	1647	15.0	3.2	76	2.6
Racines, tubercules et fruits amylacés								
4	Manioc, fermenté, séché	<i>Manihot utilissima</i>	14	1605	1.2	0.4	94	2.1
5	Plantain frite (Alloco)	<i>Musa spp.</i>	35	1126	1.5	9.2	48	-
6	Igname épluchée, fraîche	<i>Dioscorea rotundata</i>	76	1559	7.3	0.6	86	4.0
Haricots								
7	Niébé, frais, sec	<i>Vigna unguiculata</i>	11	1430	23.1	1.4	61	3.3
8	Soja, frais, sec	<i>Glycine max</i>	10	1693	33.7	17.9	34	5.0
Noix et Graines								
9	Noix Bambara, fraîche	<i>Voandzeia subterranea</i>	8	1442	21.1	6.5	53	3.8
10	Noix de cajou torréfiée	<i>Anacardium occidentale</i>	6	2299	18.6	43.7	29	2.5
11	Noix de coco, mûre, fraîche	<i>Cocos nucifera</i>	42	1622	3.2	36.0	4	1.0
12	Cacahouète (Arachide) torréfiée, séchée	<i>Arachis hypogaea</i>	2	2487	23.2	50.9	22	2.4
13	Graines de melon, séchées	<i>Cucumeropsis edulis</i>	5	2370	28.4	52	8	3.6
Légumes								
14	Feuilles de baobab séchées	<i>Adansonia digitata</i>	10	1150	14.6	2.8	48	9.6
15	Concombre, frais	<i>Cucumis sativus</i>	95	63	0.8	0.1	3	0.6
16	Oignon, frais	<i>Allium cepa</i>	93	76	0.9	0	5	-
17	Tomate, mûre, fraîche	<i>Lycopersicon esculentum</i>	94	88	1.0	0.2	5	0.5
Fruits								
18	Mangue, mûre	<i>Mangifera indica</i>	81	255	0.9	0.2	16	1.6
19	Goyave, mûre	<i>Psidium guajava</i>	82	675	1.1	0.4	16	0.6
20	Papaye, mûre	<i>Carica papaya</i>	85	134	4.1	0.6	9	3.9
Laits								
21	Lait de vache zébu		88	301	3.4	3.8	5	0.8
22	Lait en poudre non-écrémé		3	2051	26.3	26.3	39	5.6

valeurs énergétiques, et la composition plus spécifique en minéraux, vitamines, acides aminés, etc.

Ici, nous présenterons quelques exemples représentatives des aliments de l'Afrique de l'Ouest qui ont été reproduits (avec permission) à partir des tables de Oguntona & Akinyele (1995), Cf. la bibliographie.

No.	Ca	Fe	P	K	Na	(Pro) Vit. A	Vit. B1	Vit. B2	Vit. B6	Vit. B12	Niacin	Vit. C
	mg	mg	mg	mg	mg	µg	mg	mg	mg	µg	mg	mg
Céréales												
1	60	2.5	300	400	50	-	0.38	0.11	-	-	2.0	11.4
2	50	9.0	350	310	10	-	0.31	0.04	-	-	4.6	0
3	26	10.6	330	-	-	10	0.3	0.2	-	-	3.3	0
Racines, tubercules et fruits amylacés												
4	45.0	1.6	79.0	-	-	0	0.08	0.03	-	1.0	-	0
5	6.0	0.8	66.0	610	3.0	120	0.11	0.02	1.0	0	0.6	12
6	10.4	0.6	41.2	-	-	80	0.09	0.03	-	0.5	-	-
Haricots												
7	101	7.6	383	-	-	70	0.8	0.2	-	-	2.5	1
8	183	6.1	541	-	-	55	0.7	0.3	-	-	2.0	-
Noix et Graines												
9	90	4.0	7.6	-	-	30	0.3	0.1	-	-	2.1	1.0
10	53	10.3	535	-	-	-	0.5	0.3	-	-	1.7	0
11	13	2.1	94	440	17	0	0.03	0.02	0.04	0	0.3	2.0
12	42	-	354	-	-	-	0.5	0.1	-	-	15.3	0
13	53	7.4	-	-	-	-	0.1	0.1	-	-	1.4	-
Légumes												
14	2940	-	53.4	149	-	-	0.5	1.2	-	-	-	187
15	13	0.5	30	123	4.0	0	0.02	0.01	0.04	0	0.3	14
16	21	0.3	30	140	10	0	0.03	0.05	0.1	0	0.2	10
17	29	1.7	62	-	-	1040	0.05	0.04	-	-	0.7	50
Fruits												
18	20	1.8	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	24	1.3	31	50	1.4	290	0.06	0.05	0.14	0	1.3	326
20	16	0.4	7.4	220	4	300	0.04	0.03	0.02	0	0.4	112
Laits												
21	63	0.9	-	32	-	-	-	-	-	-	-	-
22	1020	0.4	740	1270	290	170	1.1	0.23	2.0	0.6	40	-

No.	Nom	Nom scientifique	Eau %	Energie (kJ)	Protéines (g)	Lipides (g)	Saccharides (g)	Cendres (g)
Viandes, Oeufs, Poissons								
23	Viande de boeuf, moitié grasse		63	991	18.2	17.7	0	1.0
24	Viande de chèvre, moitié grasse		68	711	18.0	11.0	0	1.1
25	Poulet		72	610	20.5	6.5	0	1.0
26	Oeuf, de poule, frais		79	585	11.8	9.6	1	1.0
27	Poisson fumé		5	2644	70.4	10.2	0	16.4
Condiments								
28	Néré, fermenté (dawadawa, afitin, soumbala, nététo)	<i>Parkia biglobosa</i>	14	1859	38.5	31.2	24	-
Huiles et graisses								
29	Huile d'arachide	<i>Arachis hypogaea</i>	0	3695	0	99.9	0	0
30	Margarine		16	3000	0.1	81.0	0	-
31	Huile de palme rouge	<i>Elaeis guineensis</i>	1	3658	0	98.9	0	0.1
Boissons								
32	Bière lager en bouteille		94	120	0.2	0	2	(alc) 3.2
33	Limonade gazeuse (Coca-Cola)		92	-	0	-	14	2.8
Divers								
34	Sucre raffiné	<i>Saccharum officinarum</i>	0	1567	0	0	100	0

- : données non mentionnées

No.	Ca	Fe	P	K	Na	(Pro) Vit. A	Vit. B1	Vit. B2	Vit. B6	Vit. B12	Niacin	Vit. C
	mg	mg	mg	mg	mg	µg	mg	mg	mg	µg	mg	mg
Viandes, Oeufs, Poissons												
23	11	3.6	194	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	11	2.3	150	-	-	0	0.17	0.32	-	-	5.6	-
25	10	1.1	206	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	45	2.6	200	150	150	650	0.1	0.3	0.15	1.7	0.3	0
27	1696	25	284	107	54	-	-	-	-	-	-	-
Condiments												
28	310	-	260	550	250	-	1.4	1.3	-	-	-	5.2
Huiles et graisses												
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	4	0	-	-	-	3000 U.I.	0	0	-	-	0	0
31	0	0	0	0	0	20,000 U.I.	0	0	0	0	0	0
Boissons												
32	4	-	12	34	4	0	-	0.02	0.02	0.14	0.33	0
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Divers												
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(U.I.) : unités internationales.

QUELQUES FACTEURS DE DÉTÉRIORATION DES ALIMENTS

2.1 Les micro-organismes et leur comportement

2.1.1 Classification des micro-organismes importants dans l'industrie alimentaire

Les micro-organismes jouent un rôle fondamental dans la nature, participant aux cycles des éléments chimiques et entretenant des relations nombreuses et variées avec les autres êtres vivants. Certaines de ces relations se manifestent au niveau du tube digestif et influencent directement les processus de digestion. La matière alimentaire brute est également le siège de développements et d'activités microbiennes diverses. Au cours des traitements et transformations technologiques, l'homme s'efforce de maîtriser et de contrôler ces activités et parfois de les utiliser.

Un micro-organisme est un organisme vivant, le plus souvent végétal, que l'on peut seulement observer à l'aide d'un microscope (voir lexique). Les micro-organismes peuvent être classés en cinq groupes majeurs : les virus dépourvus de structure cellulaire, les protozoaires qui sont de structure unicellulaire, les bactéries, les levures et les champignons ou moisissures. Les trois derniers groupes sont importants en sciences alimentaires. Quelques caractéristiques de ces trois groupes sont présentées au tableau 2.1.1.

Bactéries	forme : coques, bâtons, ou spirales grandeur : 1 à 3 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{mm}$), le plus souvent unicellulaires.
Levures	forme : ovoïde, grandeur : $\approx 10 \mu\text{m}$, grand pouvoir de fermentation des saccharides en alcool et dioxyde de carbone, le plus souvent unicellulaires.
Champignons	forme : mycélium multicellulaire, grandeur d'une cellule : $\approx 20 \mu\text{m}$.

Tableau 2.1.1
Caractéristiques distinctives des bactéries, des levures et des champignons

Les bactéries sont des organismes unicellulaires de type primitif (cellule procaryote), alors que les levures et les champignons ont dans leurs cellules des structures comparables à celles des cellules animales (cellule eucaryote).

2.1.1.1 Les bactéries

On distingue les bactéries par quelques propriétés morphologiques comme la forme des cellules, la structure de l'enveloppe autour de la cellule et leurs propriétés métaboliques et génétiques.

La cellule bactérienne présente différentes formes dont les plus courantes sont la coque (Figure 2.1.1) (par exemple : streptocoque) et le bacille (ou bâton), voir figure 2.1.2. Ses dimensions varient de 0,2 à une dizaine de μm . La cellule bactérienne est limitée par une membrane cytoplasmique et par une enveloppe de structure variable selon les espèces. La nature chimique de cette enveloppe permet de classer les bactéries en deux groupes, Gram+ et Gram-, à l'aide d'une coloration simple (la coloration de Gram, voir aussi le lexique).

Il est difficile de donner des notions générales sur la physiologie des bactéries, parce qu'il existe une grande diversité de types trophiques et respiratoires. Les bactéries intéressantes pour la microbiologie alimentaire sont hétérotrophes : ça veut dire qu'elles nécessitent la présence d'un substrat organique. Certaines espèces sont saprophytes, vivant librement dans la nature ; d'autres sont des commensales de l'homme ou des animaux et enfin d'autres sont des parasites ou possèdent un pouvoir pathogène ou toxique.

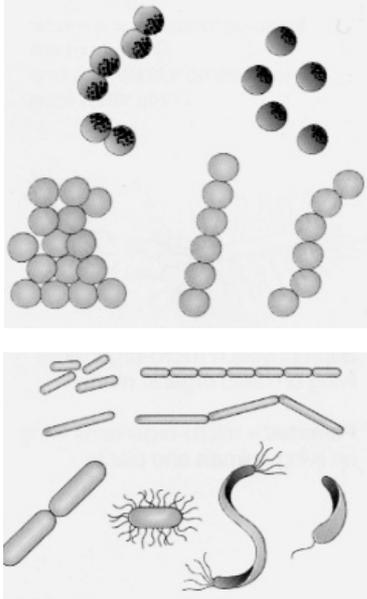


Figure 2.1.1
Les bactéries sphériques (coques) se présentent en divers groupements

Figure 2.1.2
Les bactéries de forme bâton et spirale

Selon les espèces, les bactéries sont aérobies ou anaérobies et ceci d'une manière stricte ou facultative. Les aérobies ont besoin d'oxygène pour vivre. Les anaérobies sont détruits par l'oxygène; ils ne peuvent vivre qu'en absence d'oxygène et pour les anaéro-

Tableau 2.1.2
Quelques groupes de bactéries importantes dans l'industrie alimentaire

Bactéries	Exemples
1. Coques : souvent Gram-positif, ne forment jamais de spores, de types aérobies ou anaérobies	Staphylococcus, Streptococcus, Diplococcus
2. Bâtons : a) non-sporulés : - Gram-positif, - Gram-négatif	Lactobacillus ("bactérie du lait"), Escherichia coli, Salmonella
b) sporulés : toujours Gram-positif : - aérobie, - anaérobie	Bacillus, Clostridium

bies facultatifs, l'oxygène n'a pas d'influence sur leur vie. Le tableau 2.1.2 présente quelques exemples de bactéries.

Dans des conditions défavorables, certaines espèces formeront une spore bactérienne : partie de la cellule qui est formée dans certaines circonstances et qui est assez résistante à la chaleur. Quand, après un traitement à la chaleur, la spore survit, elle peut se développer en une nouvelle cellule.

Les cellules peuvent avoir une mobilité active grâce à l'existence d'un système ciliaire ; un ou plusieurs cils à position polaire ou périphérique.

2.1.1.2 Levures

Les levures ne sont pas classifiées comme les bactéries, mais selon l'assimilation et la fermentation des saccharides. Beaucoup d'espèces de levures ont un pouvoir caractéristique de fermentation. Exemples de levures : *Saccharomyces*, *Candida*. La structure cellulaire est présentée sur la figure 2.1.3. La plupart des levures se multiplient par bourgeonnement (Figure 2.1.4) tandis que certaines se divisent comme les bactéries (par exemple les *Schizosaccharomyces*).

2.1.1.3 Champignons

Il y a une distinction très compliquée selon les caractéristiques de morphologie, de multiplication, etc. Des exemples de quelques champignons très répandus sont *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium* et les *Mucorales*. La figure 2.1.5 montre la structure du mycélium de *Penicillium* comme micro-organisme multicellulaire.

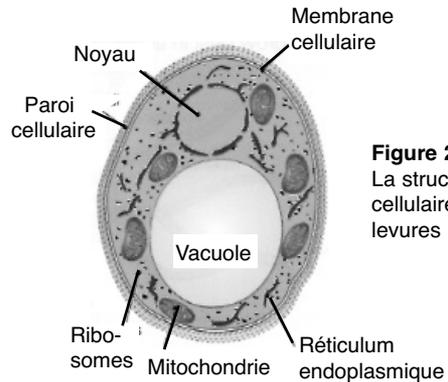


Figure 2.1.3
La structure cellulaire des levures

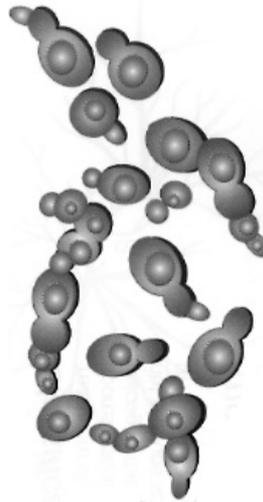


Figure 2.1.4
Des levures se multiplient par formation des bourgeons

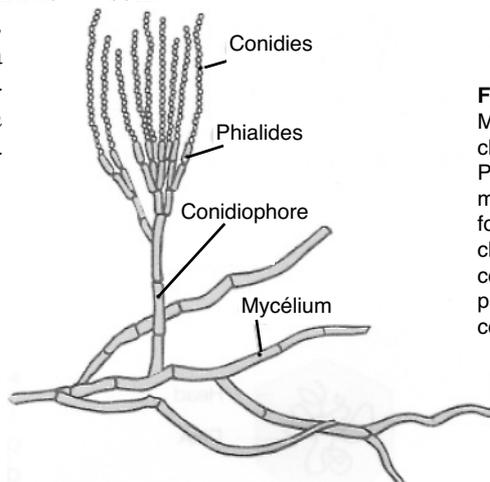
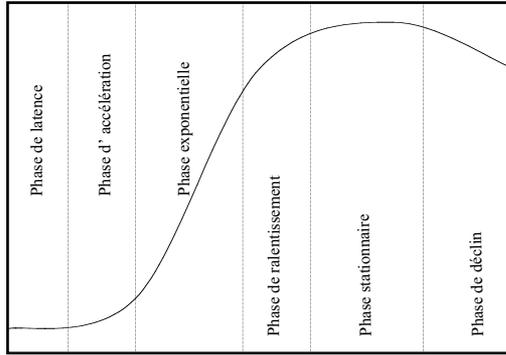


Figure 2.1.5
Mycélium du champignon *Penicillium* sp. se multipliant par formation des chaînes de conidies par les conidiophores

2.1.2 La croissance des bactéries

Une culture microbienne se multiplie selon des phases de latence, d'accélération, de croissance exponentielle, etc. comme présentées par la figure 2.1.6. Une division binaire correspond à un cycle de division cellulaire. La durée totale d'un cycle de division cellulaire est appelée le temps de génération t_g .

Figure 2.1.6
Les phases de croissance d'une culture microbienne



$$\begin{aligned}
 t = 0 &\rightarrow N_0 \text{ cellules} \\
 t = t_g &\rightarrow 2N_0 \\
 t = 2t_g &\rightarrow 4N_0 \\
 t = 3t_g &\rightarrow 8N_0 \\
 t = n \cdot t_g &\rightarrow 2^n N_0 \rightarrow N_t = 2^n \cdot N_0
 \end{aligned}$$

Si r_d = le nombre de dédoublements par unité de temps :

(2.1)

$$N = r_d \cdot t \text{ et } r_d = \frac{1}{t_g}$$

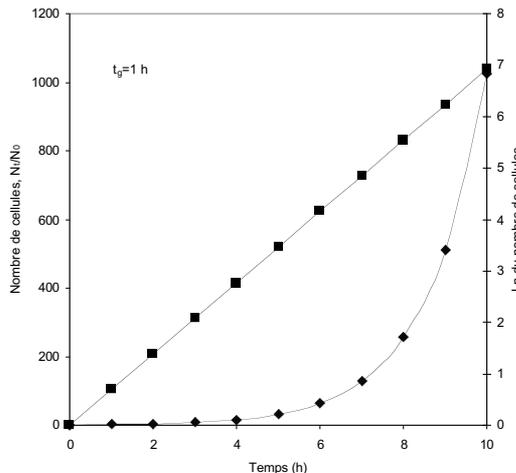
$$N_t = 2^{r_d \cdot t} \cdot N_0 = 2^{\frac{t}{t_g}} \cdot N_0 \rightarrow \frac{N_t}{N_0} = 2^{\frac{t}{t_g}}$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = \frac{t}{t_g} \cdot \ln 2$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = \mu \cdot t \rightarrow \frac{N_t}{N_0} = e^{\mu \cdot t}$$

$$\mu = \text{taux de croissance} = \frac{1}{t_g} \cdot \ln 2 = r_d \cdot \ln 2 = 0,693r_d$$

Figure 2.1.7
Déroulement linéaire et logarithmique de la phase exponentielle



Cette équation est valable seulement pour la phase exponentielle ! La figure 2.1.7 présente la croissance exponentielle.

2.1.3 Facteurs influençant la multiplication des micro-organismes

Les micro-organismes présentent une variété étonnante de types métaboliques. Pour leur vie (entretien ou maintenance), pour leur développement (croissance et multiplication), pour l'expression de leurs propriétés (mobilité, luminance...), ils ont besoin d'énergie et d'éléments nutritifs. Le catabolisme est l'ensemble des réactions qui permettent la récupération d'énergie biologiquement utilisable et la production de métabolites de base à partir de nutriments. L'anabolisme est l'ensemble des réactions qui permettent les synthèses cellulaires à partir des métabolites de base et d'éléments du milieu. La plupart des modifications des aliments sont liées à ces mécanismes.

2.1.3.1 Présence de substances nutritives

Pour qu'un micro-organisme se développe, il doit trouver dans le milieu tous les éléments nécessaires à ses synthèses et les conditions psychochimiques favorables. Presque tous les micro-organismes intéressants pour l'alimentation sont hétérotrophes. Ça veut dire qu'ils ont un besoin obligatoire d'une et parfois de plusieurs substances organiques, qui servent comme source d'énergie. Les éléments nécessaires sont C, H, O, N en quantité importante, P et S en quantité plus faible et enfin des éléments en quantité très faible, les sels minéraux et oligo-éléments (Ca, Co, Mg, Mn, Na, K, ...).

2.1.3.2 Présence de l'eau

Les conditions optimales de survie et de développement d'un micro-organisme nécessitent un milieu contenant une certaine quantité d'eau libre. Cette exigence varie selon les espèces. Les aliments peuvent être classés selon leur activité de l'eau (a_w) qui est le rapport entre la pression de vapeur de la solution (milieu, aliment) et celle de l'eau pure. Le tableau 2.1.3 montre la différence entre le taux d'humidité et l' a_w . Les aliments hygroscopiques (lexique) ont un fort pouvoir d'incorporation de l'eau. Par conséquent, ils auront la même a_w que les aliments moins hygroscopiques. Les activités de l'eau compatibles avec la vie et le développement microbien varient de 0,6 à 1. Les espèces pouvant se développer dans des produits à faible a_w sont appelées xérophiles; celles résistant à une forte concentration en sucre ou en sel sont respectivement appelées osmophiles et halophiles (Tableau 2.1.4).

Produit	Eau (%)	a_w	Qui peut survivre ?
Oeuf en poudre	10	0,95	Champignons + Levures + Bactéries
Farine de froment	13	0,90	Champignons + Levures
Légumes séchés	14-18	0,80	Champignons
Amidon	18	0,75	Xérophiles, halophiles ou osmophiles
Fruits séchés	25	0,70	Limite de sécurité pour la conservation

Tableau 2.1.3 (gauche)
Teneur en eau (%) de quelques aliments qui ont une a_w de 0,70

Tableau 2.1.4 (droite)
Influence de l' a_w sur la vie microbienne

2.1.3.3 Température

On distingue différentes catégories de micro-organismes selon leur optimum de croissance en fonction de la température :

- Psychrophiles : -5 à +15 °C,
- Mésophiles : +15 à +40 °C,
- Thermophiles : +40 à +55 °C.

Selon la température, le dédoublement sera plus rapide comme le montre le tableau 2.1.5 où l'on a observé la croissance dans le lait cru. Le tableau 2.1.6 indique la croissance bactérienne dans le lait cru après 24 h, en fonction de la température.

Tableau 2.1.5 (gauche)
 Temps de dédoublement (t_g) en fonction de la température

Température	7° C		20° C	
	≥ 12 h	1,3 h	4	2 500
Streptococcus	≥ 12 h	1,3 h	4	2 500
Pseudomonas	4 h	1,3 h	10	12 000
Escherichia coli	≥ 6 h	1,1 h	20	500 000
			35	2 500 000

Tableau 2.1.6 (droite)
 Croissance bactérienne en 24h en fonction de la température ($N_0 = 2\ 000$)

Il ne faut pas confondre micro-organisme thermophile et thermorésistant. La thermorésistance est l'aptitude à résister à un traitement thermique alors que la thermophilie est son aptitude à se développer à haute température. Quelques groupes de bactéries forment des spores ; les spores à faible résistance comme celles de *Clostridium botulinum* type E résistent 10 minutes à 90 °C ; les spores à haute thermorésistance peuvent résister 45 minutes à 120 °C. Quelques exemples sont données dans le tableau 2.1.7.

Tableau 2.1.7
 Thermorésistance de quelques micro-organismes

Groupe de micro-organismes	Combinaison temps/température mortelle pour 1 million de germes à pH = 6,5
La plupart des levures, des champignons et des bactéries pathogènes N.S.	10 min/63 °C ou 3 min/70 °C
Toutes les levures, les champignons et les bactéries N.S.10 min/80 °C
Bactéries S. peu résistantes 30 min/110 °C ou 5 min/120 °C
Bactéries S. résistantes, dans quelques aliments.45 min/120 °C
Bactéries S. les plus résistantes, se trouvant dans le sol. 15 min/155 °C

(S. = Sporulées, N.S. = Non Sporulées)

2.1.3.4 Le pH

Le comportement des micro-organismes par rapport au pH est variable (Tableau 2.1.8). On appelle acidophiles les micro-organismes dont le pH optimum se situe au-dessous de 5,5 mais, en industrie alimentaire, on a l'habitude de classer les micro-organismes entre ceux qui peuvent se développer au-dessus et au-dessous de pH 4,5. Le pH 4,5 permet de séparer les aliments en deux groupes par rapport à leur aptitude à permettre la croissance des principales bactéries pathogènes. Au dessous de ce pH les risques sanitaires sont minimes.

pH	Valeurs importantes pour l'industrie alimentaire
6,0 - 7,5	tous les micro-organismes survivent, c'est le pH de la plupart des aliments.
4,5 - 6,0	seulement les micro-organismes acidotolérants survivent, c'est le pH de beaucoup de fruits.
2,2 - 4,5	activité et survie des micro-organismes sont très limitées; concentré de fruits (citrons)

Tableau 2.1.8

Importance du pH pour la conservation des aliments

2.2 Les altérations d'origine microbienne : maladies et détérioration

La plupart des produits alimentaires contiennent des micro-organismes, exceptés quelques rares produits alimentaires qui sont naturellement stériles (comme par exemple le contenu des oeufs frais.) Les légumes et les fruits sont porteurs de germes normalement présents dans le sol, l'air ou l'eau. Les viandes contiennent des germes initialement présents chez l'animal ou qui sont introduits au cours des différentes opérations de préparation. Certains de ces micro-organismes sont néfastes à la qualité de l'aliment, d'autres au contraire sont indispensables parce qu'ils participent à l'élaboration de l'aliment. Il existe un certain nombre dont la présence ou la prolifération dans l'aliment peut avoir des conséquences plus ou moins graves pour le consommateur.

Les micro-organismes peuvent être les causes des maladies. L'aliment peut être porteur de quelques germes pathogènes, qui vont se multiplier dans le corps humain et causer des maladies (fièvre typhoïde, choléra, dysenterie). L'aliment peut être le milieu où se multiplie une grande quantité de micro-organismes qui, après, sont consommés avec l'aliment (intoxication alimentaire paratyphoïde). L'aliment peut être le milieu de multiplication de micro-organismes, qui sécrètent des substances toxiques (botulisme ; intoxication par les staphylocoques).

2.2.1 Les différentes catégories de maladies liées à la consommation des aliments

Les maladies infectieuses : sont dues à la prolifération du germe au détriment du tissu de l'hôte.

Les toxi-infections : les germes ($10^6 - 10^9$) produisent des substances toxiques spécifiques dont le pouvoir toxique dépend de la charge microbienne.

Les intoxications : sont dues à des exotoxines produites par les micro-organismes; dans ces cas, la présence des germes eux-mêmes dans l'organisme de l'hôte n'est pas indispensable.

**2.2.2 Les principaux micro-organismes pathogènes
d'origine alimentaire****2.2.2.1
Campylobacter
jejuni**

Type : maladie infectieuse

Maladie : diarrhée dont la durée moyenne est de 2 – 3 jours.

Sources : aliments d'origine animale (lait, volaille, viande).

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	pH _{croissance}	a_w
30 °C	45 °C	42 °C	5,0 - 8,0	très sensible à la dessiccation

Valeur de D et z : 4,5 min (50° C), 6 – 8 °C

Maladie infectieuse : dose infectieuse > 5 x 10² cellules vivantes

**2.2.2.2
Listeria
monocytogenes**

Type : maladie infectueuse (Listériose).

Maladie : elle provoque la méningite et aussi dans certains cas une septicémie périnatale.

Sources : le germe est transmis par les aliments tels que le lait cru, les produits laitiers non ou mal pasteurisés, les viandes et les poissons.

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	pH _{croissance}	a_w - min
0 °C	45 °C	30 °C	5 - 9	survit dans les conditions sèches

Valeur D : 17 s (64 °C), 8 s (68° C)

Valeur de z : 6,6 °C

**2.2.2.3
Mycobacterium
tuberculosis**

Type : maladie infectueuse

Maladie : la tuberculose.

Sources : elle est transmise surtout par le lait cru (sécrétion des malades).

Caractéristiques : *Mycobacterium tuberculosis* est inactivée par la pasteurisation.

Valeur de D : 15 min (60 °C)

Valeur de z : 6 °C

**2.2.2.4
Shigella**

Type : maladie infectueuse appelée shigellose.

Maladie : elle se manifeste par la dysenterie, la diarrhée et la fièvre. Ses symptômes apparaissent après 10 h.

Sources : elle est couramment transmise par les aliments crus tels que les légumes et les salades.

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}
5 °C	45 °C	37 °C

Type : toxi-infection et intoxication.

Maladie : diarrhée abondante après 10 h (toxi-infection) ou vomissements très violents après 30 min – 5 h (intoxication).

Sources : *B. cereus* est transmise par les produits à base de viande et de volaille, les puddings et les mets à base de riz cuit à l'avance.

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	pH _{croissance}	a_w min
10 °C	40 °C	30 °C	5 - 9	0.91 – 0.95

Bacillus cereus produit deux types de toxines : l'entérotoxine protéique (facteur diarrhéique) et la toxine polypeptidique (facteur émétique).

Valeur D : 0,04 min (121 °C, pH 6,8)

Valeur de z : 9 – 10° C

Toxi-infection : dose infectieuse > 10⁸ cellules vivantes.

Type : toxi-infection et intoxication.

Maladie : diarrhée, nausée, vomissement; les symptômes apparaissent après 8 – 24 h.

Sources : les aliments d'origine animale (viandes, poisson).

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	pH _{croissance}	a_w min
15 °C	50 °C	40 °C	5,8 - 8,0	0.93

- anaérobie strict!

- le nombre de bactéries végétatives diminue dans les aliments réfrigérés ou congelés.

- Valeur de *D* : 10 min (115 °C).

- La toxine de *Clostridium perfringens* n'est pas thermostable.

Toxi-infection : dose minimale > 10⁸ cellules vivantes

$t_g = 40$ min.

Type : toxi-infections.

Maladie : on distingue des différents types pathogènes :

EPEC : *E.coli* entéropathogène,

ETEC : *E.coli* entérotoxique (responsable de gastro-entérite et

2.2.2.5

Bacillus cereus

2.2.2.6

Clostridium perfringens

2.2.2.7

Escherichia coli entéropathogène

de la “diarrhée des voyageurs” (dose minimale $> 10^8$ cellules vivantes),

EIEC : *E.coli* entéro-invasive,

EHEC : *E.coli* entérohémorragique (notamment *E.coli* O157 : H7)

Sources : elle est transmise par les aliments tels que les viandes mal cuites, les produits laitiers crus et les pâtisseries.

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	$\text{pH}_{\text{croissance}}$
10 °C	40 °C	37 °C	4,4 - 9,0

N.B. : *E.coli* et ses entérotoxines sont sensibles à la chaleur.

2.2.2.8 *Salmonelles*

Type : toxi-infection (endotoxine) et maladie infectieuse.

Maladie :

gastro-entérite et fièvre intestinale par toxi-infection :

les symptômes apparaissent après 12 - 24 h, et peuvent persister pendant plusieurs semaines. Dose minimale $> 10^5$ cellules vivantes.

fièvre (para) typhoïde (maladie infectieuse) :

symptômes : nausée, mal de tête, fièvre élevée et persistente (quelques semaines), malaise. Les symptômes apparaissent après 7 - 28 jours selon la dose d'infection. Causée par de faibles doses de *Salmonella typhi* et *S.paratyphi*.

Sources : viandes, volailles, poissons, œufs, cycle d'infection par les eaux de surface et les effluents, les ustensiles, les mains!

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	$\text{pH}_{\text{croissance}}$	$a_w \text{ min}$
5 °C	46 °C	37 °C	5 - 9	0,94

Endotoxine : thermostable

Valeur D : 1,5 – 4,5 min (63 °C, pH 6,8)

Valeur de z : 4 – 5 °C

Toxi-infection : $> 10^5/\text{g}$

t_g : 25 min

2.2.2.9 *Vibrio parahaemolyticus*

Type : toxi-infection.

Maladie : elle provoque une gastro-entérite accompagnée de nausées et de vomissements. Les symptômes apparaissent après 72 h. C'est une maladie particulièrement grave chez les personnes atteintes de troubles hépatiques.

Sources : elle est principalement transmise par les produits de la mer (poisson, crevettes, etc).

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	pH_{\min}	$a_w \text{ min}$
5 °C	43 °C	37 °C	5	nécessite 3 -9 % NaCl

t_g : 12 min.

Remarque : *Vibrio parahaemolyticus* est une espèce halophile que l'on trouve donc dans les produits salés.

Maladie infectueuse : $\geq 10^5/\text{g}$

Type : toxi-infection.

Maladie : elle se manifeste par la gastro-entérite, la fièvre, la méningite, la polyarthrite. Les signes cliniques disparaissent au bout de 48 h.

Sources : le germe est transmis par les aliments crus, en particulier le lait et les produits laitiers, les viandes et les volailles.

Caractéristiques : *Yersinia enterocolitica* est une espèce cryophile; elle est donc très sensible à la chaleur.

T_{\min}	T_{\max}	$\text{pH}_{\text{croissance}}$
0 °C	45 °C	5 - 9

Dose de toxi-infection : $> 10^9/\text{g}$

Type : intoxication (botulisme); il existe 8 sérotypes (A, B, C₁, C₂, D, E, F, G).

Maladie : les toxines inhibent l'activation de l'acétylcholine au niveau des synapses neuro-musculaires, conduisant à des troubles nerveux, des vomissements, des crampes abdominales, des troubles respiratoires, la paralysie et la mort du sujet si aucun soin adéquat ne lui est apporté. Les symptômes apparaissent après 12 à 72 h. La botuline est un des poisons les plus violents connus. $\text{DL}_{50} = 10^{-8} - 10^{-9}$ g par kg de poids corporel.

Sources : de nombreux aliments présentent de très grands risques de contamination, notamment les conserves qui subissent un traitement thermique insuffisant. C'est le cas des conserves de viande, de poisson et de légumes. Elle n'est cependant pas transmise par les aliments acides.

Caractéristiques :

	T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	pH_{\min}	$a_w \text{ min}$
A, B, C	10 °C	48 °C		4,6	0,94
B, E, F	3 °C	45 °C		5,0	0,97

Clostridium botulinum est une bactérie anaérobie stricte.

2.2.2.9

Vibrio parahaemolyticus

2.2.2.10

Yersinia enterocolitica

2.2.2.11

Clostridium botulinum

2.2.2.11 *Clostridium botulinum*

Valeur D : Type A et D : 1 min. 113 °C
Type C : 1 min. 100 °C
Type E : 1 min. 80 °C

Valeur de z : 7 – 12 °C

Stérilisation : 12 D

Remarque : la germination des spores et la prolifération du germe peuvent être inhibées par addition de nitrite (agent conservateur) à des doses supérieures à 20 ppm. Les toxines sont aussi dénaturées par le chauffage à 80 °C pendant 10 min, ou à 100 °C pendant 5 s.

2.2.2.12 *Staphylococcus aureus*

Type : intoxication

Maladie : gastro-entérite, vomissement; les symptômes sont rapides (2 – 4 h) ; le rétablissement est rapide (1 – 2 jours). C'est une cause majeure d'intoxication alimentaire.

Sources : les aliments à forte teneur en sel ou en sucre (fromage, viande, volaille et poisson séchés). *S. aureus* révèle une contamination après la transformation.

Caractéristiques :

T_{\min}	T_{\max}	T_{opt}	pH _{croissance}	a_w min
6° C	45 °C	35° - 37 °C	4 - 9	0,86

S. aureus produit plusieurs entérotoxines qui sont thermostables.

Valeur D : 7 – 20 min (63 °C, pH 6,8)

Valeur de z : 5 – 5,1 °C

Intoxication : dose toxique 1 - 25 µg d'entérotoxine; ce niveau faut $\geq 10^6$ /g cellules vivantes.

2.2.2.13 *Les virus*

Type : maladie virale

Maladie : les virus transmis par les aliments provoquent des maladies telles que la diarrhée, l'hépatite et la poliomyélite. Les virus les plus importants sont Norwalk (NLV), rotavirus et hépatitis-A virus.

Sources : ils sont transmis par divers types d'aliments tels que le lait, l'eau, les coquillages, les fruits et légumes.

Caractéristiques : les virus ne peuvent pas croître dans les aliments; ils sont assez thermostables. Leur inactivation nécessite des températures > 70 °C. Ils ne sont pas tous dénaturés par le séchage; ils sont résistants aux antibiotiques; les maladies peuvent être provoquées par des dizaines de particules.

Ce sont les métabolites de divers champignons parasites et moisissures. Elles sont produites lorsque des moisissures se développent sur des graines ou leurs tourteaux.

Aflatoxines : Elles sont produites par certaines espèces de moisissure telles que : *Aspergillus flavus*, *Aspergillus parasiticus* lorsque la moisissure se développe sur des graines oléagineuses, arachides notamment, ou dans des tourteaux. On distingue de nos jours 6 différents types d'aflatoxines : B₁, B₂, G₁, G₂, M₁ et M₂ (on trouve M₁ et M₂ dans le lait, ce sont des métabolites produits par la vache). L'aflatoxine est cancérigène et cause la dégradation du foie. La teneur maximale admise dans les aliments est de 10 ppb (µg/kg).

Fumonisines : Elles sont produites par le développement de *Fusarium moniliforme*, surtout dans les produits d'origine tropicale, par exemple, le maïs. Selon leur structure chimique on connaît 6 types (A₁, A₂, B₁, B₂, B₃, B₄). Les fumonisines sont cytotoxiques et cancérigènes. Chez l'homme on a constaté le cancer de l'oesophage, chez les chevaux la leuco-encéphalomalacie fatale, et chez les porcs l'oedème pulmonaire. Comme les fumonisines sont solubles dans l'eau on a pu réduire la contamination du maïs par la mouture et l'extraction en phase humide.

Ochratoxine : C'est une mycotoxine produite par le développement d'*Aspergillus ochraceus* et *Penicillium cyclopium* sur les céréales, les fèves, l'arachide. Elle cause la dégradation des reins et l'entéritis.

Stérigmatocystine : Cette mycotoxine est produite par le développement d'*Aspergillus versicolor*, et *Aspergillus flavus* sur les graines de café et les grains de blé. Elle est cancérigène.

Patuline : Elle est produite par le développement de moisissures du genre *Aspergillus* sur des pommes. Elle cause des œdèmes et des hémorragies.

2.2.2.15 Conclusion

Les maladies diarrhéiques constituent un des problèmes de santé les plus importants dans les pays en voie de développement. Elles conduisent souvent à :

- une issue fatale,
- une alimentation réduite,
- la perte d'éléments nutritifs ou leur mauvaise absorption,
- le déclenchement ou l'aggravation de la malnutrition.

Le respect des règles d'hygiène dans chaque maillon de la chaîne de fabrication, l'entretien des locaux et du matériel dans un bon état de propreté, le respect des consignes de traitement (chauffage, pasteurisation, stérilisation, etc.) et de conservation, sont indispensables pour sauvegarder la santé des consommateurs.

2.2.2.14

Les mycotoxines

2.2.3 Les altérations d'origine microbienne

2.2.3.1 Les principaux facteurs

Les facteurs les plus importants qui influencent la croissance des micro-organismes dans les aliments sont : le pH, la température, l' a_w et le potentiel d'oxydo-réduction.

L'altération de l'aliment est perceptible à des taux supérieurs à 10^7 bactéries/g et 10^5 levures/g.

La modification des glucides : La modification des glucides s'effectue de plusieurs façons :

- l'hydrolyse des polysaccharides, ce qui affecte la texture du produit ;
- les fermentations alcoolique, lactique, butyrique, gluconique, le cycle de Krebs, etc.
- la formation des acides carboxyliques, d'alcools, de cétones, d'aldéhydes, des odeurs et des saveurs.

La modification des protéines : Elle s'effectue de diverses façons :

- l'hydrolyse des protéines en peptides et acides aminés affectant ainsi la texture du produit ;
- les réactions de décarboxylation conduisant à la formation d'amines ;
- les réactions de désamination conduisant à la formation d'acides organiques + NH_3 .
- "la fermentation putride" et la putréfaction résultant de ces différentes réactions.

La modification des lipides : Elle est la résultante de deux types de réactions :

- la lipolyse qui conduit à la libération des acides gras,
- l'oxydation des lipides conduisant au phénomène de rancissement.

2.2.3.2 Les conséquences de la dégradation microbienne

La dégradation des aliments par les micro-organismes entraîne successivement la modification de l'odeur, de la couleur, du goût et de l'aspect.

Les odeurs : Elles sont variables selon la nature de la molécule qui en est responsable. Exemple : triméthylamine, mercaptan, diméthylsulfure, sulfure d'hydrogène, ammoniac, acide butyrique, diacétyl, rancissement.

La couleur : L'altération des produits se caractérise souvent par l'apparition de zones colorées à la surface. Cette modification de couleur est essentiellement due à :

- la synthèse de pigments,
- la destruction ou la transformation de pigments naturels (carotène, myoglobine, polyphénols).

Le goût : La modification du goût est caractérisée essentiellement par l'aigreur du produit.

Aspect/structure/texture : La dégradation de ces trois caractères résulte de :

- la modification de macromolécules (pectine, (hemi) cellulose, protéines),
- la synthèse de macromolécules (exemple : dextrane).

La valeur nutritionnelle : L'une des conséquences de l'altération d'origine microbienne des aliments est la modification de la valeur nutritionnelle pouvant conduire à son amélioration ou le plus souvent à sa perte. La valeur nutritionnelle est affectée par :

- la réduction de la valeur calorique possible (négative),
- la synthèse de molécules à activités biologiques (positive ou négative selon les cas),
- la destruction des produits toxiques/antinutritionnels (positive),
- la putréfaction (négative).

Des exemples de dégradations d'origine microbienne des principaux types d'aliments sont donnés dans le tableau 2.2.1.

Tableau 2.2.1

Dégradation d'origine microbienne des principaux types d'aliments

Aliment	Type de dégradation	Micro-organismes incriminés
Beurre et matières grasses	Colorations	<i>Pseudomonas</i> , <i>Penicillium spp</i> , <i>Serratia marcescens</i>
	Goût, odeurs	<i>Pseudomonas</i> , <i>Candida spp</i>
Bière	Rancissement	<i>Pseudomonas fragi</i> , <i>P. fluorescens</i>
	Dépôts	Levures
Charcuterie	Goûts divers	Coliformes, levures "sauvages", <i>Pediococcus cerevisiae</i> , <i>Zymomonas spp</i>
	Piqûre acétique	<i>Gluconobacter</i>
	Piqûre lactique	<i>Lactobacillus spp</i>
	Viscosité	<i>Lactobacillus brevis</i>
	Acidification	Bactéries lactiques
	Colorations	<i>Leuconostoc</i> , <i>Pseudomonas spp</i>
Conserves	Moisissure	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium spp</i>
	Viscosité	<i>Leuconostoc</i> , <i>Streptococcus spp</i> , levures
	Fermentation de type butyrique avec bombage	<i>Bacillus gazogènes</i> , <i>Clostridium butyricum</i> , <i>Cl. perfringens</i> , <i>Cl. thermosaccharolyticum</i>
	"Flat sour"	<i>Bacillus coagulans</i> , <i>B. stearothermophilus</i>
Farine	Noircissement	<i>Clostridium nigrificans</i>
	Putréfaction	<i>Clostridium putrefaciens</i> , <i>Cl. sporogenes</i>
	Fermentation	<i>Bacillus spp</i> , Levures
Fromages	Moisissure	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium spp</i> , mucorales
	Gonflement butyrique	<i>Clostridium butyricum</i>
Fruits	Goûts divers	Bactéries protéolytiques, <i>Bacillus polymyxa</i> , <i>Enterobacter aerogenes</i>
	Viscosité	<i>Alcaligenes</i> , <i>Pseudomonas spp</i>
	Anthracnose	<i>Colletotrichum lindemuthianum</i>
Fruits secs	Moisissure	<i>Alternaria</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium spp</i> <i>Botrytis cinerea</i>
	Pourriture molle	<i>Rhizopus nigricans</i>
Jus de fruits et sirops sucrés	Fermentation alcoolique et goût de levure	<i>Saccharomyces</i> , <i>Zygosaccharomyces spp</i>
	Moisissure	<i>Aspergillus glaucus</i>
	Mauvais goût et fermentation alcoolique	<i>Byssoschlamys</i> , <i>Rhizopus spp</i> , levures
	Piqûre acétique	<i>Acetobacter</i> , <i>Gluconobacter spp</i>
Lait	Piqûre lactique	Bactéries lactiques diverses
	Troubles et dépôts	Levures
	Viscosité	<i>Leuconostoc spp</i>
	Colorations et goûts divers	<i>Pseudomonas synchyneae</i> , <i>P. fluorescens</i>
	Protéolyse	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas spp</i> .
	Protéolyse avec gaz	Coliformes, <i>Clostridium spp</i> .
Sûrissement et coagulation	Sûrissement et coagulation	<i>Streptococcus lactis</i> et autres bactéries lactiques
	Viscosité	<i>Alcaligenes viscosus</i> , <i>Leuconostoc</i> , <i>Streptococcus spp</i> .

Aliment	Type de dégradation	Micro-organismes incriminés
Légumes	Anthracnose	<i>Colletotrichum lindemuthianum</i>
	Fermentation acide et viscosité	<i>Aspergillus, Fusarium, Trichoderma spp., Arthrobacter, Cellulomonas spp.</i>
	Moisissure	<i>Botrytis cinerea, Alternaria, Aspergillus, Fusarium, Penicillium, Peronospora, Phytophthora</i>
	Pourriture molle	<i>Erwinia carotovora, Xanthomonas spp., Rhizopus spp., Sclerotia sclerotinium</i>
Oeufs	Colorations diverses	<i>Proteus melanogenes, Pseudomonas, Rhodotorula spp., Serratia marcescens</i>
	Moisissure	<i>Cladosporium, Penicillium, Sporotrichum spp.</i>
Pain	Goût "crayeux"	<i>Endomycopsis fibuliger, Trichosporon spp.</i>
	Moisissure	<i>Aspergillus niger</i> et autres <i>Aspergillus</i> , mucorales, <i>Penicillium spp.</i>
	Viscosité	<i>Bacillus spp.</i>
Poisson	Modification de couleur	<i>Achromobacter, Flavobacterium, Pseudomonas spp.</i>
	Putréfaction	Coliformes, <i>Clostridium, Pseudomonas spp.</i>
Viandes	Modification de couleur et odeur	levures, <i>Leuconostoc, Pseudomonas, Rhodotorula spp.</i>
	Moisissure	<i>Aspergillus, Penicillium spp.</i> , mucorales, <i>Sporotrichum carnis, Thamnidium elegans</i>
	Putréfaction	<i>Clostridium</i> protéolytiques, coliformes, <i>Proteus spp.</i>
	Sûrissement	<i>Bacillus cereus, Clostridium</i> butyriques, bactéries lactiques
	Viscosité	<i>Bacillus, Pseudomonas spp.</i> , bactéries lactiques

2.3 Les altérations d'origine chimique et biochimique

2.3.1 Les lipides

2.3.1.1 Oxydation

Oxydation chimique

Les composants de la réaction : Les substrats de ces réactions sont principalement les acides gras non saturés et l'oxygène. Lorsqu'ils sont libres, les acides gras non saturés s'oxydent en général plus vite que quand ils font partie de triglycérides ou de phospholipides. Mais c'est surtout le degré d'insaturation qui influence la vitesse d'oxydation.

Mécanismes des réactions d'oxydation des lipides : On peut distinguer dans l'oxydation des lipides, quatre groupes de réactions :

- **Les réactions d'initiation :** Elles donnent lieu à la formation de radicaux libres à partir d'acides gras non saturés ou de peroxydes lipidiques (appelés aussi hydroperoxydes). Elles se déroulent en trois étapes successives qui sont montrées en

figure 2.3.1, la formation de l'oxygène singulet, la formation de l'hydroperoxyde, et la formation de radical (Figure 2.3.2).

Fig. 2.3.1
 Oxydation des lipides.
 A. Formation d'oxygène singulet
 B. Formation d'hydroperoxyde

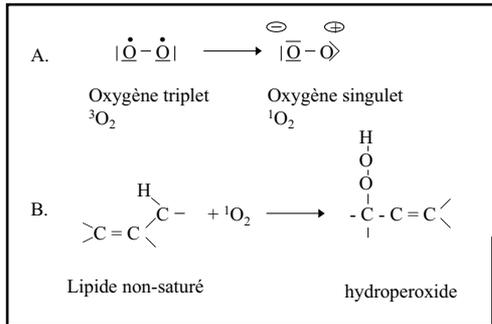
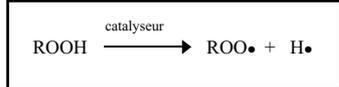
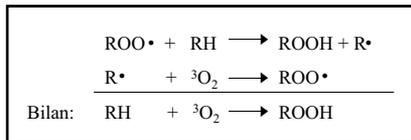


Fig. 2.3.2
 Formation de radicaux d'hydroperoxyde



- **La propagation :** La propagation est constituée par une chaîne de deux réactions présentées en figure 2.3.3. Ces réactions sont en général rapides, car les radicaux libres porteurs d'un électron non apparié sont très réactifs. La propagation aboutit à une oxydation en peroxydes des acides gras non saturés qui va de pair avec une consommation d'oxygène moléculaire.

Fig. 2.3.3
 Réactions de propagation



- **L'arrêt :** En même temps que les réactions d'initiation et de propagation, des réactions d'arrêt peuvent se produire et entraîner la disparition d'une certaine proportion de radicaux libres.

- **La décomposition de l'hydroperoxyde :** Elle aboutit à la formation de cétones et d'aldéhydes volatils. Les aldéhydes volatils qui se forment sont importants du point de vue pratique, en raison de leur odeur de rance. Certains d'entre eux (2-décenal, hexanal, par exemple) sont perceptibles à des concentrations très faibles, de l'ordre du microgramme par litre.

La figure 2.3.4 montre la formation de radicaux libres et des peroxydes à partir de l'acide oléique, et la figure 2.3.5 le schéma général des réactions d'oxydation des lipides.

Quelques Remarques :

* *La formation de l'oxygène singulet* : elle s'effectue par différentes voies :

- des réactions enzymatiques (lipoxygenase, peroxydase, xanthine-oxydase);
- la lumière (photo-oxydation);
- en présence de traces de métaux (Fe^{2+} , Cu^{2+}) et d'acide ascorbique.

* *Les catalyseurs sont* : Fe^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} (le changement de valence le plus favorable est : $2 \leftrightarrow 3$).

* *L'auto-oxydation* au cours de laquelle les peroxydes jouent le rôle de catalyseur.

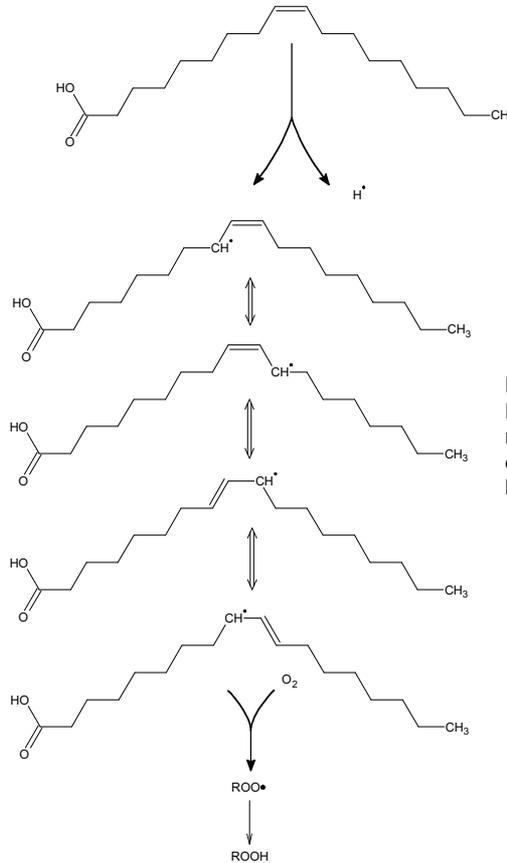


Fig. 2.3.4
La formation de radicaux libres et des peroxydes à partir de l'acide oléique

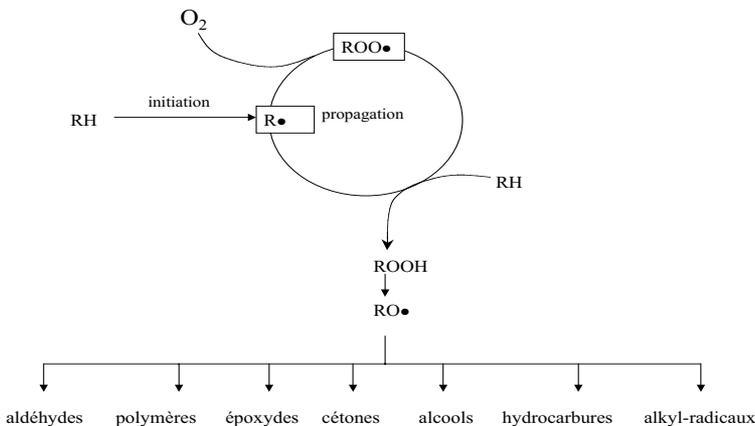
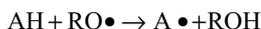
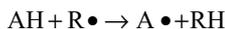
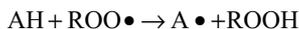


Fig. 2.3.5
Schéma général d'auto-oxydation

Les moyens d'éviter ou de freiner l'oxydation : Pour un certain nombre d'aliments, notamment pour les aliments déshydratés et ceux à teneur moyenne en eau, il est nécessaire de recourir à des substances ou à des méthodes permettant de retarder l'oxydation des lipides au-delà du délai normal de vente.

• *Les antioxydants* : Ces substances sont capables d'interrompre la chaîne radicalaire :



Le radical $\text{A}\bullet$ qui se forme est relativement stable, et ne réagit pas avec les lipides. Il subit une réaction d'arrêt aboutissant à la formation de produits non radicalaires :



Ces substances antioxydantes diminuent donc le nombre de radicaux libres; elles abaissent par conséquent la vitesse d'oxydation.

Selon leurs origines on distingue :

* *les antioxydants naturels* :

- tocophérol (vitamine E),
- certains acides aminés,
- acide ascorbique,
- complexants de métaux;

* *les antioxydants synthétiques* :

- gallate de propyle,
- BHA (butylhydroxyanisol),
- BHT (butylhydroxytoluène).

Leurs doses maximales sont fixées en fonction de leur degré de toxicité.

- *L'absence d'oxygène* : Elle permet d'éviter la formation de l'oxygène singulet. Pour cela l'absence ou tout au moins le maintien d'une très basse teneur en oxygène dans l'atmosphère entourant l'aliment est très important. Ainsi les aliments sont emballés sous vide ou sous atmosphère d'azote.
- *L'utilisation d'agents complexant les métaux* : Ce sont des composés qui agissent en empêchant ou en diminuant la formation des radicaux libres en se complexant avec les catalyseurs (métaux).

L'éthylène diamine tetra-acétate (EDTA) est un agent complexant très efficace, mais peu utilisé dans les aliments car il n'est généralement pas autorisé par la réglementation. L'acide citrique, au contraire, est employé très souvent.

- *La déshydratation* : L'activité catalytique des métaux dépend en partie de l'activité de l'eau. Il est important de maintenir l' a_w dans les aliments entre 0,1 et 0,4 ; le maintien d'une a_w autour de 0,2 est idéal pour empêcher l'oxydation des lipides.

L'influence de la température : Le rôle de la température dans l'oxydation des lipides est complexe. La vitesse d'oxydation augmente avec la température. En revanche une température élevée peut entraîner la formation d'antioxydants.

Les conséquences de l'oxydation des lipides : Les conséquences des réactions d'oxydation se situent essentiellement à deux niveaux :

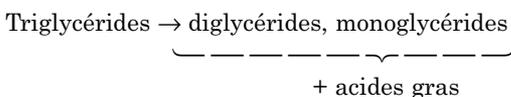
- *la perte de la qualité organoleptique* : due d'une part à la formation de composés volatils d'odeur désagréable, et d'autre part à la perte de couleur.
 - *la diminution de la valeur nutritionnelle* : à cause d'une part de la perte d'activité vitaminique (l'oxydation des vitamines A et E et des caroténoïdes peut être due aussi à l'action des peroxydes au dépend des acides gras insaturés), et d'autre part de la perte d'acides gras essentiels.
- En général c'est le rancissement qui se manifeste le premier et rend l'aliment inconsommable avant que les autres aspects ne prennent de l'ampleur.

Lipoxygénase

Elle est responsable de l'oxydation d'acides gras insaturés avec formation d'hydroperoxydes et de radicaux. Elles sont aussi responsables de l'oxydation de certaines vitamines, protéines et acides aminés (CysSH, Tyr, His, Trp). Son activité entraîne la perte de la valeur nutritionnelle, la production d'odeur et d'arôme, la modification de couleur. Elle est surtout présente dans les légumes.

2.3.1.2. Hydrolyse enzymatique

Les lipases (hydrolases) : Elles sont présentes dans les aliments, et sont aussi produites par les micro-organismes.



Les produits de leurs activités en particulier les molécules d'acides gras en $C_4 - C_{12}$ qui sont partiellement solubles dans l'eau, conduisent au rancissement des aliments (goût du savon).

Oxydation enzymatique

2.3.2 Les protéines

2.3.2.1 Réactions à chaud

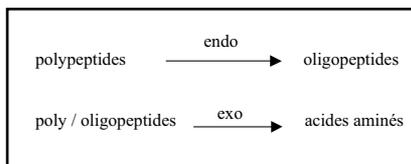
L'application de la chaleur sur les aliments au cours de traitements domestiques ou industriels influence la qualité des protéines. Les réactions des protéines à chaud au cours de ces traitements culinaires domestiques ou industriels entraînent des modifications qui ont des effets favorables et défavorables. Parmi ces modifications on peut citer :

- la dénaturation qui correspond à un ou à des changements de conformation : déploiement de la molécule globulaire et démasquage de résidus d'acides aminés entraînant une perte de la réactivité;
- la réduction de la solubilité; la formation de précipités, de gels ou de pâtes;
- l'amélioration de la digestibilité;
- la perte de l'activité enzymatique;
- la diminution du pouvoir toxique de facteurs antinutritionnels et de toxines (inhibiteurs protéiques, lectines);
- la réaction de Maillard en présence de sucres réducteurs conduisant à la formation de ponts covalents intra ou intermoléculaires avec baisse de disponibilité de la lysine;
- la désamination de l'asparagine et de la glutamine;
- l'isomérisation de résidus d'acides aminés (L → D) : baisse de valeur nutritionnelle;
- la formation de ponts covalents intra- ou intermoléculaires de nature isopeptidique (γ -glutamyl- ϵ -N-lysine) ou de type lysinoalanine : baisse de digestibilité;
- des réactions entre molécules de cystéine avec :
formation de ponts covalents -S-S-,
désulfuration,
- la formation de lanthionine, de lysinoalanine;
- la formation de composés fortement mutagènes (par exemple au cours du grillage au feu);
- la baisse de la digestibilité après un traitement thermique dur, surtout avec un traitement alcalin.

2.3.2.2 Protéinases (*exo, endo hydrolases*)

La figure 2.3.6 montre la distinction entre des *exo* et *endo* hydrolases. Les activités des protéinases affectent la texture et le goût

Figure 2.3.6
L'action des
endo et *exo*
hydrolases



des aliments. Elles sont cependant utilisées en technologie alimentaire (exemple : la coagulation du lait par la présure) et aussi actives pendant le stockage (exemple : durant la maturation du fromage).

Elles sont généralement inactivées par la chaleur (mais parfois très résistantes comme la plasmine dans le lait).

2.3.3 Les polysaccharides

Altérations causées par les hydrolases (polysaccharidases)

Ce sont essentiellement les pectinases, les cellulases et les amylases. Elles sont naturellement présentes dans les aliments et sont aussi produites par les micro-organismes. Leurs activités influent sur la texture et le goût des aliments.

2.3.4 Le brunissement

2.3.4.1 Le brunissement non-enzymatique : La réaction de Maillard

Généralités : C'est un ensemble très complexe de réactions aboutissant, dans divers aliments, à la formation de pigments bruns ou noirs, à des modifications, favorables ou indésirables, de l'odeur et de la saveur et à la perte de la valeur nutritionnelle. La réaction a été décrite par Louis Maillard en 1912.

Le brunissement non-enzymatique se manifeste lors des traitements technologiques ou de l'entreposage, de divers aliments dont voici quelques exemples :

- Croûte de pain, biscuits,
- Lait stérilisé,
- Viande cuite, rôties
- Pommes frites,
- Café,
- Chocolat,
- Jus de fruit,
- Bière.

La réaction de Maillard est une réaction entre une fonction carbonyle (aldéhydes, cétones, sucres réducteurs) et une fonction amine (acides aminés, résidus de lysine dans les protéines).

Mécanisme des réactions : Le mécanisme consiste en plusieurs réactions qui se déroulent en chaîne. D'abord la condensation de Maillard ou formation de carbonylamine (Figure 2.3.7) qui met en jeu une fonction carbonyle libre et une fonction amine, suivi par la formation de la base de Schiff (Figure 2.3.8), et le réarrangement d'Amadori (de Heyns) (Figure 2.3.9). Les produits d'Amadori sont relativement stables. Pendant les réactions 1 à 3 qui constituent la première phase, il n'y a pas encore de brunissement.

N.B. : comme l'indique la figure 2.3.15, le pH influence la première phase. En effet à bas pH,

Figure 2.3.7

La réaction de Maillard (1). La condensation entre sucre réducteur et amine

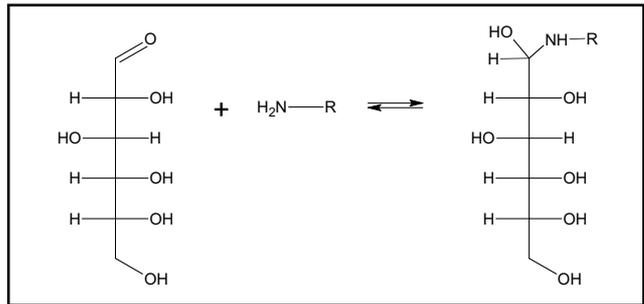
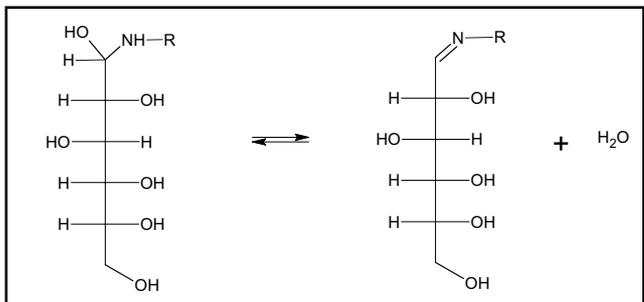


Figure 2.3.8

La réaction de Maillard (2). La formation de la base de Schiff

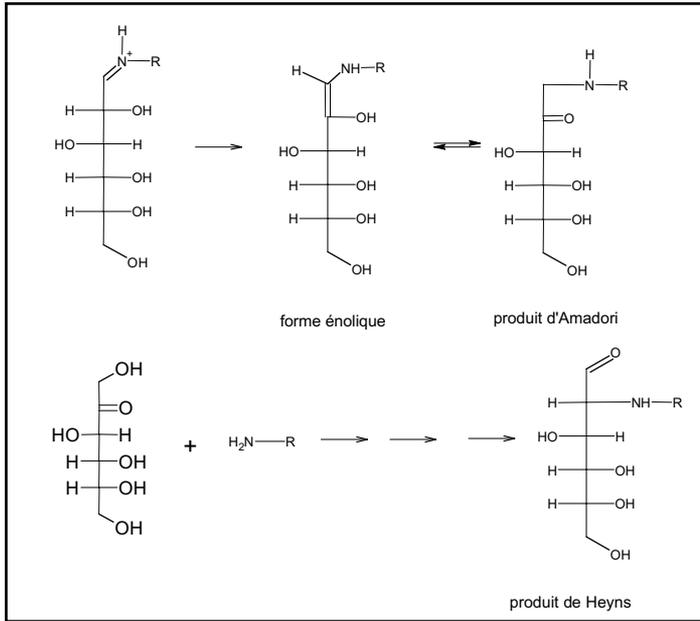


la réaction 1 est inhibée, tandis que la réaction 2 est accélérée par les protons (H^+).

Ensuite, la dégradation du produit d'Amadori est fortement dépendante du pH :

- à $pH < 6$: elle conduit à la formation de réductones, d'aldéhydes insaturés, de dicarbonyls insaturés, de 5-hydroxyméthylfurfural (HMF);
- à $pH > 6$: elle conduit à des réductones, des furanones, des scissions hydroxyliques et aussi aux acides formique et acétique qui entraînent l'abaissement du pH.

Figure 2.3.9
La réaction de Maillard (3). Le réarrangement d'Amadori (de Heyns)



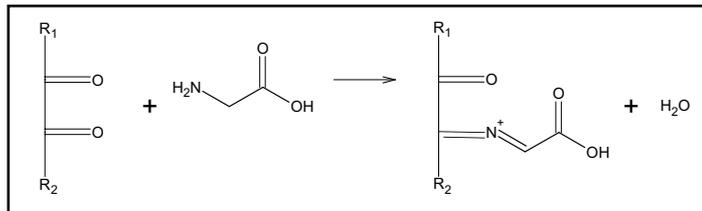
Pendant la réaction suivante, la dégradation de Strecker (Figure 2.3.10) les composés α -dicarboxylés résultant de la décomposition des cétoamines peuvent réagir avec un acide aminé et entraîner la dégradation de ce dernier. La réaction de α -dicarboxylés avec un acide aminé entraîne la production de $CO_2 + NH_3 +$ nouveaux composés carbonylés. Les réactions 4 + 5 (Figures 2.3.10 et 2.3.11) qui constituent la deuxième phase de la réaction de Maillard conduisent à la formation de composés très réactifs, d'odeurs et

de saveur désirable ou indésirable et d'antioxydants.

La condensation des composés carbonylés avec des amines (Figure 2.3.12) est la troisième et dernière phase de la réaction de Maillard. Cette étape qui constitue la réaction 6 conduit à la formation de polymères bruns appelés mélanoidines.

Enfin la figure 2.3.13 résume la réaction de Maillard.

Figure 2.3.10
La réaction de Maillard (4). Dégradation de Strecker



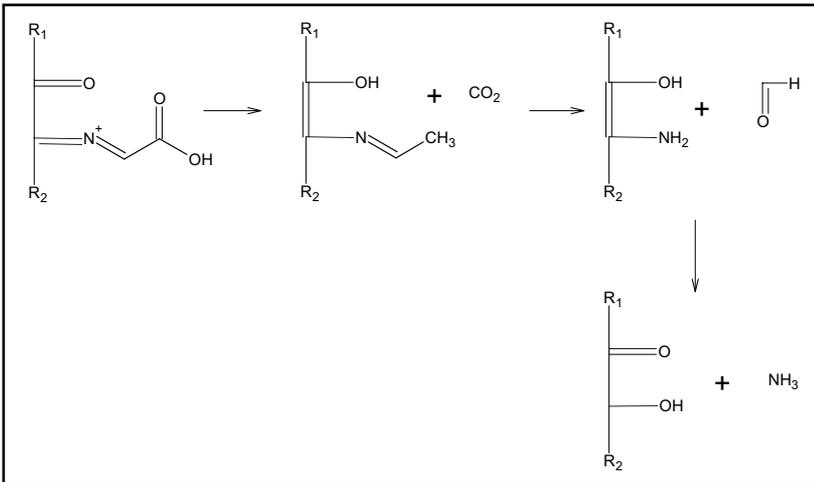


Figure 2.3.11
La réaction de Maillard (5).
Dégradation de Strecker
(suite)

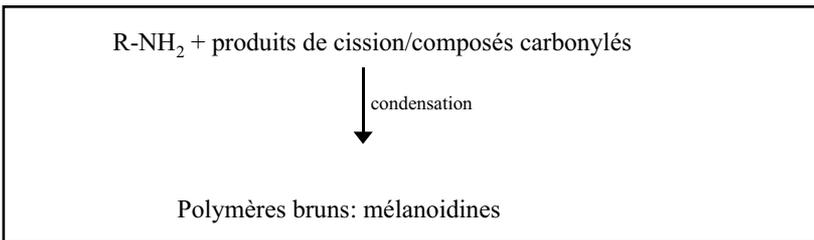


Figure 2.3.12
La réaction de Maillard (6).
Condensation des composés carbonylés avec des amines

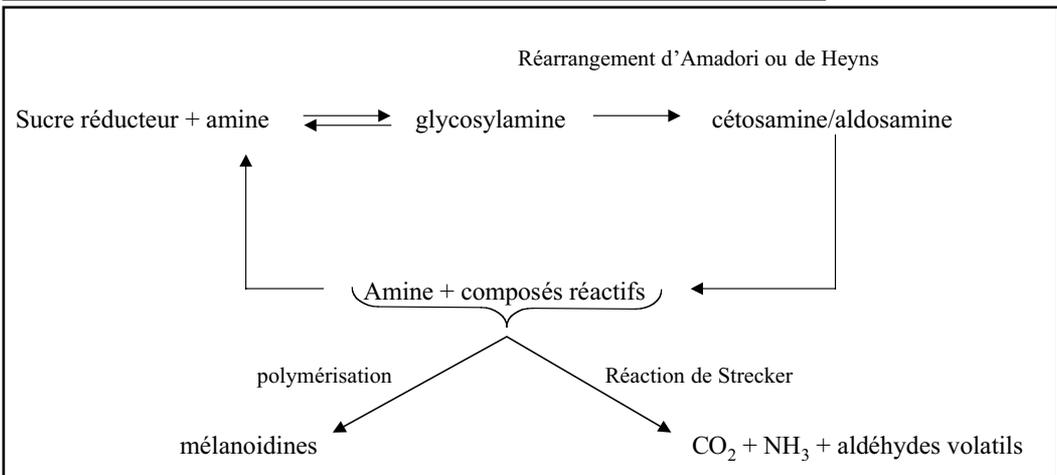


Figure 2.3.13
Résumé de la réaction de Maillard

Les facteurs influençant la réaction de Maillard : Divers facteurs physiques ou chimiques affectent non seulement la vitesse mais aussi la nature des réactions de brunissement non enzymatique :

- *La nature des sucres réducteurs :* Les pentoses, et notamment le ribose, sont les sucres réducteurs les plus réactifs; les hexoses (glucose, fructose) sont un peu moins réactifs, et les disaccharides réducteurs (lactose, maltose) encore moins.
N.B. : le saccharose, qui ne possède pas de fonction réductrice libre, n'entraîne pas de brunissement non enzymatique, sauf dans les aliments acides, où il est progressivement hydrolysé

en glucose et fructose; en solution aqueuse neutre, il peut également être inversé, si toutefois la température dépasse 130 °C.

- *La température* : Les étapes du brunissement non enzymatique sont des réactions chimiques normales. Leur énergie d'activation E_a est d'environ 100 kJ/mole et leur $Q_{10} \approx 3$.

- *L'activité de l'eau, a_w* : L'influence de l'activité de l'eau sur la vitesse du brunissement non enzymatique dans la plupart des

aliments peut être représentée par la figure 2.3.14. La vitesse de brunissement passe par un maximum entre $a_w = 0,55$ à $0,75$. Les aliments déshydratés jusqu'au niveau de la couche monomoléculaire d'eau sont les plus stables, à condition d'être gardés à l'abri de l'humidité (emballage imperméable à la vapeur d'eau) et à une température modérée (25 °C).

- *Le pH* : Les effets du pH (Figure 2.3.15) sont complexes car chacune des réactions qui interviennent dans le brunissement présente son propre pH optimum : 6 à 8 pour la condensation de Maillard,

proche de 7 également pour le réarrangement d'Amadori, 5,5 pour la dégradation des cétosamines par énolisation. D'autre part les milieux fortement acides ou alcalins catalysent la transformation directe des sucres en composés carbonylés insaturés capables de se polymériser.

Figure 2.3.14
L'influence de l' a_w sur le brunissement non-enzymatique

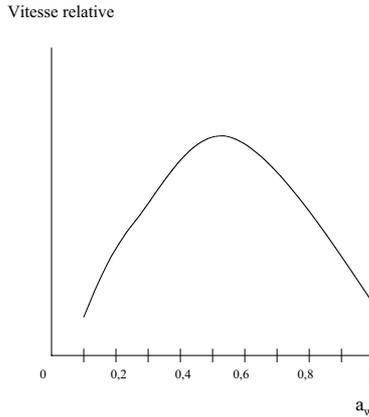
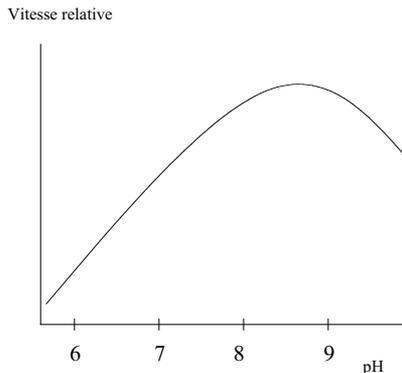


Fig. 2.3.15
L'influence du pH sur le brunissement non-enzymatique



Conséquences et prévention de la réaction de Maillard : En résumé on peut dire que la réaction de Maillard affecte plusieurs aspects de la qualité des aliments, notamment :

- la couleur,
- l'odeur, l'arôme, la saveur, le goût,
- la perte de la valeur nutritionnelle due principalement à son impact sur les protéines (diminution de lysine disponible, de la digestibilité et de la solubilité).
- cependant elle forme des composés qui ont des propriétés antioxydantes.

Les moyens de prévenir le brunissement non enzymatique sont relativement peu nombreux. Outre l'élimination des substrats, l'abaissement du pH, la surveillance de la température et de l'humidité, l'addition d'agents inhibiteurs est un moyen efficace de prévenir la réaction de Maillard. Le seul inhibiteur efficace du brunissement non enzymatique est, jusqu'à présent, l'anhydride sulfureux, utilisé sous forme de gaz (SO_2) ou de sels (NaHSO_3). Les sulfites réagissent avec les composés carbonylés, les bases de Schiff, les composés insaturés, en donnant des sulfonates qui sont des produits stables.

L'anhydride sulfureux et les sulfites sont utilisés dans :

- le moût de raisin et le vin,
- les fruits déshydratés,
- les pulpes pour confiture,
- les jus concentrés,
- la purée déshydratée de pomme de terre,
- les tranches de pommes de terre déshydratées.

2.3.4.2 Le brunissement enzymatique

Définition : On appelle brunissement enzymatique la transformation, enzymatique dans ses premières étapes, de composés phénoliques en polymères colorés, le plus souvent bruns ou noirs. Les étapes de cette transformation sont présentées en figure 2.3.16.

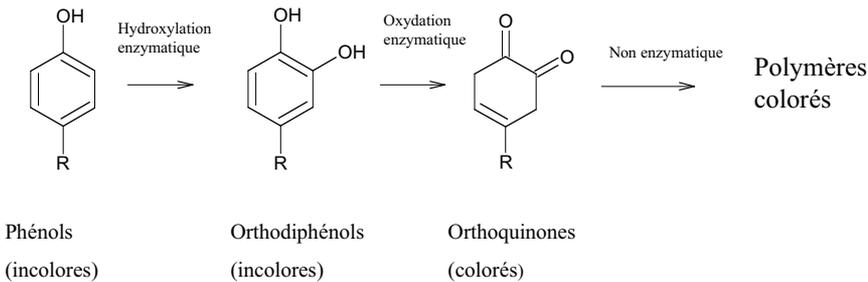


Fig. 2.3.16
Le brunissement enzymatique

Le brunissement enzymatique s'observe chez les fruits et légumes. Il pose des problèmes de couleur, en particulier lorsque les tissus sont malades ou endommagés (par traitement); dans les tissus intacts il n'y a pas de brunissement enzymatique, car les enzymes et leurs substrats sont séparés (compartiments distincts).

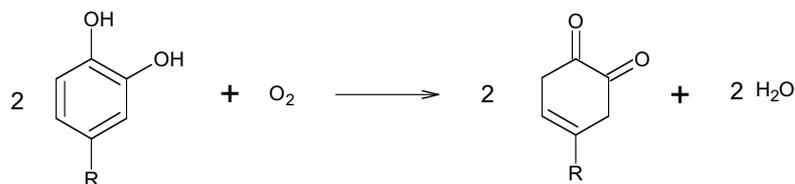
Indésirables dans certains aliments comme les pommes, les poires, les abricots, les pêches, les bananes, les avocats, les pommes de terre, les champignons, le brunissement enzymatique est désirable dans d'autres aliments tels que les dattes, le thé, le cacao (et aussi dans le tabac).

Il existe de nombreux substrats naturels, mono, di- ou polyphénoliques, du brunissement enzymatique. Les pigments qui se forment par brunissement enzymatique sont désignés par le terme général

de mélanines. Leur teinte finale est brune ou noire, mais il existe des intermédiaires de couleurs diverses : rose, rouge, bleu-noir.

Mécanisme : Comme il est montré à la figure 2.3.17, la première étape (hydroxylation) est catalysée par l'enzyme monophénolase (crésolase). La deuxième étape (oxydation) est quant à elle catalysée par l'enzyme polyphénoloxydase (polyphénolase, catécholase). L'oxygène moléculaire est l'accepteur d'hydrogène. La vitesse de brunissement enzymatique est souvent limitée par la teneur en substrats (et non celle en enzyme). Le pH optimal de ses réactions se situe entre 5 et 7.

Fig. 2.3.17
L'étape
d'oxydation dans le
brunissement
enzymatique



Prévention du brunissement enzymatique : Il existe de nombreux moyens pour empêcher le brunissement enzymatique, mais pour des raisons de coût, de toxicité, de réglementation ou d'effets secondaires défavorables à la qualité, seuls certains d'entre eux sont utilisés en pratique, et sont mentionnés ci-après :

- inactivation des enzymes par la chaleur (blanchiment, pasteurisation),
- addition de composés réducteurs : acide ascorbique,
- immersion des fruits dans l'eau salée ou sucrée : limite l'accès de l'oxygène,
- abaissement du pH (acide citrique),
- enlèvement de l'oxygène par le vide, ou par N₂,
- addition d'anhydride sulfureux (SO₂) ou de bisulfite : réaction avec les quinones, peut-être aussi avec l'enzyme.

2.4 Les arthropodes

2.4.1 Introduction

Distinction entre les insectes et les arachnides

Les arthropodes constituent la plus grande classe et regroupe les animaux ayant un squelette extérieur et dur. Les arthropodes comprennent les classes des insectes et des arachnides. Le tableau 2.4.1 donne quelques caractéristiques facilitant la distinction des classes, et le tableau 2.4.2 présente plusieurs insectes et mites importants. Les illustrations de l'anatomie, les métamorphoses et les espèces mentionnées au tableau 2.4.2 sont présentées sur les figures 2.4.1 – 2.4.12 qui sont mentionnées aussi dans les tableaux.

Tableau 2.4.1
Les Arthropodes

Phylum	Arthropoda (> 925 000 espèces)		
Classe	Insecta (750 000 espèces)		Arachnida (60 000 espèces)
Anatomie	composée de tête, poitrine, queue; 6 pattes Figure 2.4.1		composée de prosoma (tête) et opisthosoma (poitrine); 8 pattes Figure 2.4.2
Cycle de vie (métamorphose)	incomplet (hemimetabola) oeuf - larve - image (adulte) - oeuf Figure 2.4.3.	complet (holometabola) oeuf - larve - chrysalide (pupa) - image (adulte) - oeuf Figure 2.4.4.	incomplet oeuf - larve (6 ou 8 pattes) - image (adulte; 8 pattes) - oeuf; hypopus (forme très résistante, produit lors de circonstances difficiles).
Exemples	sauterelle, cafard, perce-oreille, poux de feuille, punaise	escargots, papillons (larve : chenille), mouche (larve : vers), guêpes, abeilles, fourmis	araignées, mites (< 1 mm)

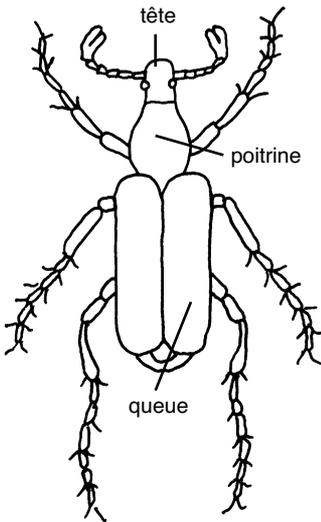


Figure 2.4.1
Anatomie d'un insecte

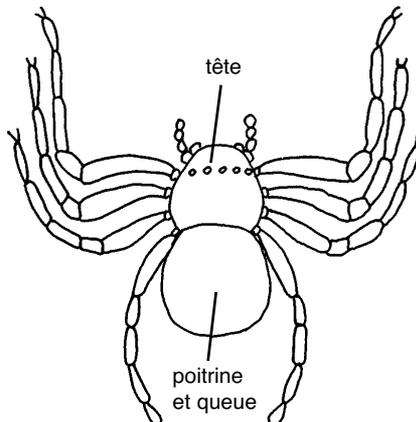


Figure 2.4.2
Anatomie d'une araignée

Figure 2.4.3
Métamorphose incomplète

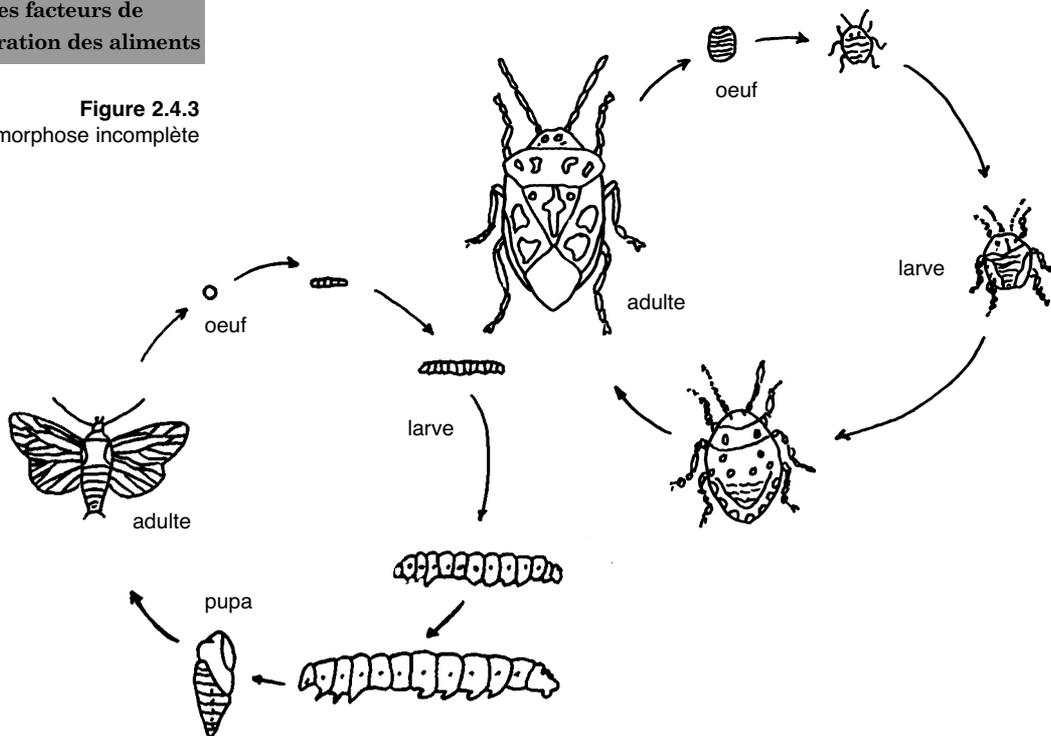


Figure 2.4.4
Métamorphose complète

Nom scientifique	Nom vulgaire	Remarques	Figure
<i>Acarus siro</i>	Mite de farine		2.4.5
<i>Anagasta kuehniella</i>	Teigne de meunerie	13-15 mm; on la trouve là où il y a de la farine, l'insecte volant est le plus important. Les larves mangent le produit en laissant des traces gluantes	2.4.6
<i>Blatta orientalis</i>	Cafard oriental	2-5 cm; très actif, préfère les endroits obscurs et humides	2.4.7
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	Petit coléoptère de commerce	2-3 mm; très actif	2.4.8
<i>Sitophilus granarius</i>	Charançon	< 4 mm	2.4.9
<i>Stegobium paniceum</i>	Coléoptère des biscottes	l'insecte le plus important dans les magasins de stockage des aliments emballés	2.4.10
<i>Tenebrio molitor</i>	Coléoptère de farine	15 mm; larve 28 mm devient adulte après 2 ans; ils n'endommagent pas les aliments mais ce sont des indicateurs d'une hygiène inadéquate	2.4.11
<i>Tribolium confusum</i>	Coléoptère de farine («confused flour beetle»)	3-4 mm; longévité 1.5 ans	2.4.12.

Tableau 2.4.2
Quelques insectes importants pendant le stockage des aliments

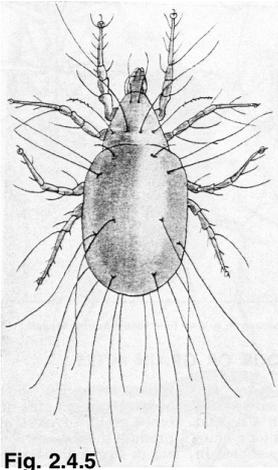


Fig. 2.4.5
Acarus siro

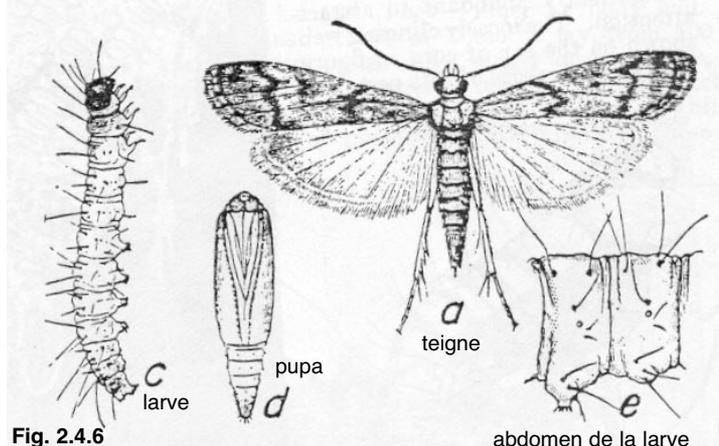


Fig. 2.4.6
Anagasta kuehniella

abdomen de la larve
(agrandi)

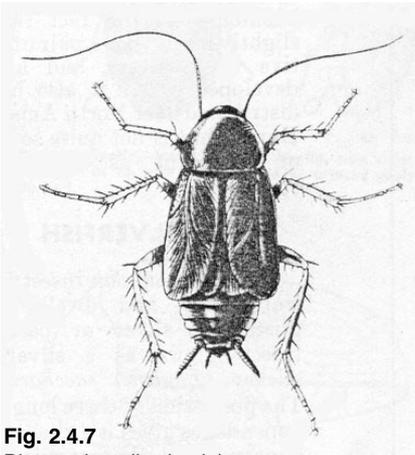


Fig. 2.4.7
Blatta orientalis (male)

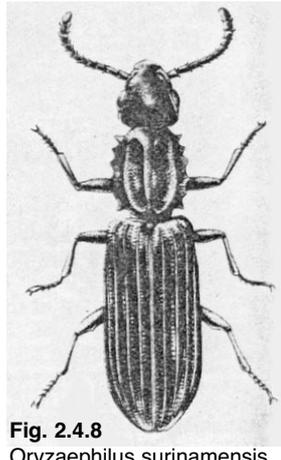


Fig. 2.4.8
Oryzaephilus surinamensis
(adulte)



Fig. 2.4.9
Sitophilus granarius
(adulte)

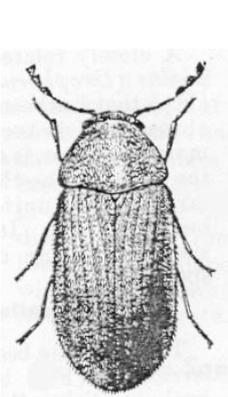


Fig. 2.4.10
Stegobium paniceum
(adulte)

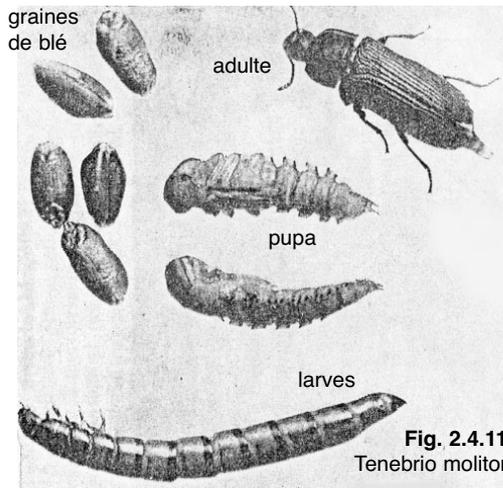


Fig. 2.4.11
Tenebrio molitor

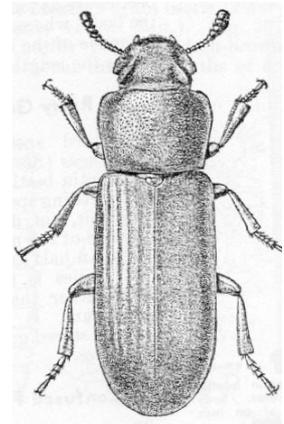


Fig. 2.4.12
Tribolium confusum
(adulte)

2.4.2 Contamination des aliments

En principe la contamination commence par la présence des insectes adultes qui déposent leurs oeufs dans l'aliment. Le dépôt des œufs par les insectes a lieu déjà depuis la récolte. Ensuite, il se poursuit au cours du séchage au sol, du stockage mal protégé, etc. Mais les oiseaux amènent aussi les insectes.

Les aliments les plus fréquemment attaqués par les insectes sont les céréales (farine, pain, produits de boulangerie) ainsi que les poissons séchés, fumés, etc.

Les conditions favorables à la multiplication des insectes sont :

- la présence de nutriments
- la protection : endroit protégé et calme où la multiplication peut s'effectuer sans détection. Par exemple, les grands bateaux à cargo, les usines avec leurs coins mal nettoyés, etc.
- la chaleur : dans l'usine et dans les appareils, la température est souvent de 8-10 °C plus élevée que la température ambiante.
- l'eau : sa disponibilité est essentielle pour la vie des insectes.

Quelques exemples d'endroits où les insectes ou leurs larves peuvent se multiplier facilement :

- silos de stockage
- les appareils à broyer, purifier, transporter
- les plafonds
- les installations pour le remplissage des sacs de farine
- les conduites d'électricité

2.4.3 Dégâts

Les dégâts causés par les insectes et les mites aux aliments et à la société sont de nature aussi bien hygiénique qu'économique.

Les dégâts hygiéniques sont surtout les maladies humaines. Les insectes jouent un rôle important comme vecteurs de germes susceptibles de provoquer des maladies.

Transmission biologique : l'insecte est hôte intermédiaire et infecte l'homme par piqûre (le paludisme, la fièvre jaune)

Transmission mécanique : l'insecte sert seulement de moyen de transport; en particulier les mouches, cafards, guêpes. De petits nombres de *Salmonella* spp par exemple, transmis par les mouches, sont capables de causer des toxi-infections alimentaires.

Les **dégâts économiques** sont causés par :

- la perte des aliments, par exemple la perte de poids de poisson fumé causé par le glouton des *Dermestes* spp (coléoptère à lard);
- la perte de qualité et d'attractivité, par exemple quand les vers bougent dans la viande ou le poisson, ou quand le fromage est endommagé par les mites.

2.4.4 Quelques règles générales pour la lutte contre les insectes dans les magasins de stockage

- Pratiquez la propreté : tenez propres les lieux de travail et de stockage. Nettoyez efficacement, n'oubliez pas les "coins morts" qui sont souvent des nids de couvain.
- Après le nettoyage, appliquez un traitement avec un insecticide pulvérisé.
- Brûlez toutes les ordures qui sont le résultat du nettoyage.
- Fermez bien toutes les jointures et fentes, après avoir nettoyé les endroits situés derrière ces fentes.
- A condition que le magasin soit vide et que les aliments ne touchent pas le sol, les murs, et le plafond, appliquez un traitement avec un pulvérisant qui forme une mince couche toxique sur le sol et les murs. Répétez l'action quelques fois par an.
- Fermez les fenêtres et toutes les autres ouvertures avec des moustiquaires.
- Laissez le moins possible de restes d'aliments non couverts. Utilisez des boîtes que l'on peut bien fermer. Brûlez toutes les ordures.
- Les matériaux d'emballage doivent être exempts d'insectes et d'oeufs. Il faut un contrôle fréquent. Une stérilisation (à la chaleur ou par fumigation) doit suivre chaque utilisation des sacs. Laver les sacs et les sécher au soleil ne suffit certainement pas.
- Chaque nouveau stock d'aliments doit être bien contrôlé pour infestation. En cas de nécessité, désinfecter par fumigation. On peut aussi lutter par fumigation contre des attaques dans les parties où sont stockés les aliments.

La fumigation est le travail d'un expert. On utilise par exemple l'acide cyanhydrique, l'oxyde d'éthylène, le bromure de méthyle, le chlorure de méthallyl, la chloropicrine.

DANGER

- Si possible, éliminer des stocks les insectes tués, les restes d'insectes, les excréments, etc. ; afin d'améliorer la qualité.

En cas d'aliments précieux ou sensibles :

- Appliquez pour les portes un système avec sas. Des deux portes, il y en a toujours une qui est fermée. Comme cela, on minimise l'entrée d'insectes. On traite le sas une fois par jour avec de l'insecticide.

Lutte directe :

de façon mécanique : suspendez des papiers tue-mouches (papiers collants); établissez des pièges à mouches (appât toxique).

de façon chimique : si l'aliment peut le supporter (qualité, odeur, etc), pulvérisation de pyrèthre en kérosène.

2.5 Les rongeurs

2.5.1 Introduction

Les rongeurs préfèrent les mêmes conditions de vie que les insectes :

- protection et calme
- nourriture
- chaleur

Les magasins de stockage, les (super) marchés, les hôtels, etc. sont en principe des lieux idéaux pour la multiplication des rongeurs.

Depuis longtemps, l'homme essaye de limiter la compagnie des rongeurs. Les anciens Egyptiens adoptaient le chat comme un animal sacré...

Les chasseurs professionnels de rongeurs étaient très importants pendant le Moyen Age, mais le sont aussi de nos jours dans les méga cités (Inde, Amérique du Sud ...)

Le tableau 2.5.1 montre les rongeurs les plus importants pour l'industrie alimentaire : ce sont essentiellement les rats et les souris. En principe les rongeurs sont intelligents et difficiles à attraper. On peut améliorer le taux de succès de la chasse par la connaissance des habitudes des animaux, et spécialement leurs sentiers. Ces sentiers peuvent être reconnus par les traces noirs ou bruns de poils et de saleté. D'autres critères de distinction sont par exemple s'ils sont capables de grimper et nager, et la forme de leurs excréments (crottes dispersées ou en groupe ; forme des crottes), s'ils sont herbivores ou omnivores, et les traces des sentiers.

Tableau 2.5.1
Quelques rongeurs importants

Nom scientifique	Nom vulgaire	Caractéristiques	Réproduction
<i>Rattus norvegicus</i>	Rat brun ou Rat de Norvège	petits yeux, vision mauvaise, nocturne, rez-de-chaussée	maturité sexuelle à 3-4 mois, 5-10 petits par mise bas
<i>Rattus rattus</i>	Rat de navire ou Rat de toit	grimpeur agile, très répandu dans les régions tropicales	200 rats par an par couple
<i>Mus musculus</i>	Souris domestique	plus petite que les rats, rayon d'activité 3-5 mètres du nid	maturité après 2 mois; 10 petits par accouchement; 2000 par an par couple

2.5.2 Dégâts

2.5.2.1 Dégâts hygiéniques

Les rats servent comme vecteur déposant les bactéries pathogènes comme *Salmonella paratyphi*. Les épidémies paratyphoïdes en particulier sont associées aux aliments « prêts à utiliser » : poisson fumé, saucisse de foie, etc. parce qu'ils ne reçoivent plus de traitement de chaleur.

2.5.2.2 Dégâts matériels

Les dommages matériels sont considérables :

- *aux stocks* (les dégâts peuvent être considérables). Un rat consomme 25 grammes par 24 heures.

- *aux objets durs* : La raison pour laquelle les rats et les souris rongent est que les dents rongeantes continuent à croître toute la vie. Le fait de ronger permet à ces animaux de les maintenir dans les limites convenables.

Exemples : un tuyau d'eau en fer rongé peut causer un dommage d'inondation ou de court-circuit; fil électrique rongé; incendie; emballage rongé.

2.5.3 La Lutte

Les rongeurs sont attirés à l'usine ou au magasin par exemple par :

- la démolition des bâtiments du voisinage
- les tas d'ordures
- le gaspillage (et le manque de nettoyage) d'aliments aux lieux de livraison

Comment peuvent-ils entrer dans l'usine ou le magasin ?

- par les murs troués pour le passage de l'eau et de l'électricité
- par les systèmes de transport du plafond
- par les écoulements non-couverts
- par les portes ouvertes
- au-dessous des portes fermées

Où est-ce qu'ils élisent domicile?

- dans les endroits peu utilisés et remplis de "choses diverses"...
- dans les magasins de stockage où les produits sont emballés de manière à créer des espaces protégés
- dans les chambres où sont stockés des emballages et des aliments, offrant ainsi la protection et la nourriture.

La lutte permanente commence avec le bon ménage : nettoyage et inspection fréquentes, stockage de telle façon qu'on peut faire l'inspection et le nettoyage tout autour des palettes chargées de produits.

En outre, il est souvent nécessaire d'appliquer *des produits toxiques*, en utilisant des appâts toxiques. Pour bien effectuer cela, les points suivants sont importants :

- changer le moins possible les environs du nid pendant l'application de l'appât toxique.
- mettre les appâts toxiques sur les sentiers, le plus près possible du nid et en quantité suffisante afin que les rongeurs puissent manger tranquillement sans se battre.
- organiser la lutte sur une superficie la plus étendue possible, de préférence en coopération avec d'autres entrepreneurs. De cette façon, cela durera plus longtemps avant que le territoire désert ne soit à nouveau occupé par des successeurs.
- pièges et cages : les mettre sur les sentiers, la porte ouverte, chargés d'appâts, pendant quelques jours. Quand on est sûr que les rongeurs mangent les appâts, on met les pièges en action.

Défense permanente :

- fermer tous les trous : réparer les vitres cassées, poser des grilles sur les tuyaux d'écoulement d'eau sale et d'égout.
- écarter les ordures : les brûler ou utiliser des poubelles bien fermées.

2.6 La détérioration et la conservation

2.6.1 La détérioration

Les exigences formulées vis à vis de la qualité des aliments sont que :

- la composition et la structure doivent être de bonne qualité, et
- ils ne doivent pas nuire à la santé.

Les facteurs de détérioration

Les facteurs de détérioration présentés dans les sections 2.1 - 2.5 risquent - indirectement ou directement – de conduire à une qualité inadéquate, ou même à des nuisances causées par les aliments. Cette détérioration peut se manifester à des niveaux différents, comme suit :

Une mauvaise qualité d'origine

- Les matières de base (les ingrédients) peuvent être insupportables (par exemple, les glands sont amers), ou même nuisibles à la santé (par exemple des champignons toxiques, ou des germes pathogènes présents dans le lait cru).
- De la même façon, les contaminations des matières de base sont insupportables (par exemple, du sable dans la farine) ou même nuisibles (des résidus de pesticides, ou des morceaux de verre).

La mauvaise qualité résultant du procédé de transformation

Par exemple un goût indésirable causé par de mauvais traitements peut être insupportable ; de même l'ajout d'une concentration trop élevée de produits chimiques toxiques, ou l'introduction des germes pathogènes pendant des traitements non-hygiéniques peuvent constituer un risque pour la santé.

La mauvaise qualité se manifestant pendant le stockage peut causer

- L'inappétence (une détérioration perceptible avec les sens, par exemple, la putréfaction, la fermentation, l'aigreur, ou la présence des moisissures). Ces aliments mal acceptés ne sont pas nécessairement nuisibles à la santé).
- La nuisance (la situation la plus dangereuse est une détérioration nuisible qui n'est pas accompagnée d'un mauvais goût ou d'une mauvaise odeur).

Tandis que la qualité et la salubrité des matières premières est d'une grande importance, la technologie alimentaire est orientée de manière à éviter les détériorations pendant les procédés de transformation, la conservation, le stockage et la distribution des aliments.

2.6.2 La conservation

Le but de la conservation est d'améliorer la durabilité ou de prolonger la période possible de garde (voir aussi lexique). Si on veut pouvoir limiter ou supprimer les mécanismes de dégradation des aliments, on doit donc jouer sur les facteurs qui y contribuent directement ou indirectement, par exemple à travers un développement microbien : la température, le pH, l'activité de l'eau et l'oxygène. De façon empirique, toutes les techniques élaborées par l'homme depuis des millénaires influent sur ces mêmes facteurs en vue de la conservation des aliments. Quelques principes importants de conservation sont résumés dans le tableau 2.6.1.

Tableau 2.6.1
Facteurs et procédés de
conservation

Facteur	Niveau	Procédés
température	élevée basse	pasteurisation, stérilisation, cuisson, blanchiment réfrigération, congélation
a_w	bas	séchage, confisage, lyophilisation, concentration, salage
pH	bas	acidification par fermentation ou addition de produits acides (vinaigre etc.)
potentiel d'oxydo-réduction	bas	emballage ou stockage sous vide ou sans oxygène
stabilisation par additifs bactériostatiques ou bactéricides, ou par compétition microbiologique		alcool, produits chimiques de conservation, antibiotiques, substances de la fumée (phénols)
pression	élevée	UHP (conservation par pression hydrostatique ultra élevée)
charge électrique	variable	conservation par champ électrique à impulsions

Les méthodes visent en général à éviter la détérioration microbienne qui est la plus importante. On peut tuer tous les micro-organismes ou éviter que les micro-organismes vivants puissent se multiplier.

Tous les micro-organismes sont tués par stérilisation (normalement 15 min à 121 °C). Au cours du procédé, on essaie d'éviter que les aliments soient changés. Après une stérilisation il faut protéger l'aliment contre une ré-infection. Tous les micro-organismes ne sont pas tués pendant la pasteurisation, mais au moins les germes pathogènes le sont. Souvent, il faut garder l'aliment dans un réfrigérateur après traitement, parce que les spores qui sont aussi capables de détériorer l'aliment, ne sont pas détruites.

Une autre méthode est de ne pas tuer tous les micro-organismes, mais de changer l'aliment plus ou moins, de façon telle que les germes ne se multiplient plus. (Bactériostatique : le micro-organisme ne meurt pas, mais il ne se multiplie plus ; bactéricide : le micro-organisme est tué); parfois, on protège un aliment contre la ré-infection.

Il y a une grande variété de combinaisons des méthodes décrites. Il faut remarquer que la prévention d'une infection microbienne est très importante. Souvent des mesures préventives par une pratique hygiénique (désinfection, nettoyage) peuvent être efficaces.

GÉNIE DES PROCÉDÉS

3.1 Les procédés et les opérations unitaires

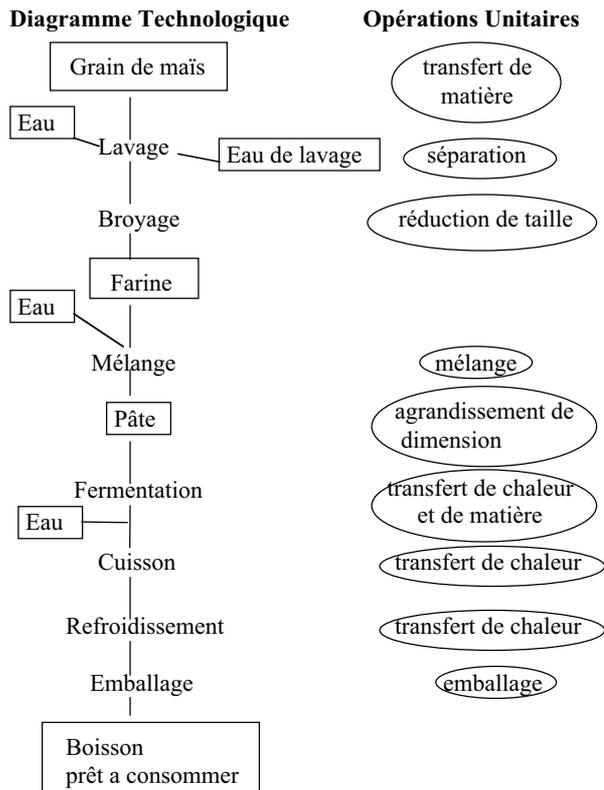
Les traitements de transformation (les Opérations Unitaires) des matières premières visent à obtenir des produits désirables et d'augmenter la durée de conservation. L'ensemble des traitements dans l'usine constitue le schéma de fabrication ou le diagramme technologique (flow sheet). On peut diviser les opérations unitaires en quelques groupes fondamentaux :

- Le transfert de matières.
- Le transfert de chaleur.
- Le mélange de matières.
- La séparation de matières.
- La réduction de la taille des matières.
- L'agrandissement de la taille des matières.
- L'emballage.

La figure 3.1.1 présente le diagramme technologique d'un procédé hypothétique de production d'une boisson à base de maïs fermenté. Dans ce diagramme on trouve aussi les opérations unitaires les plus importantes.

En théorie, le nombre de traitements est assez petit; en pratique, on a développé une grande variété d'appareils spécialisés, dépendant des produits.

Figure 3.1.1
Diagramme technologique et Opérations Unitaires



3.2 Le transfert de matière

Le transfert (ou le transport) de matière est d'une grande importance dans les procédés, la distribution, etc. Ce transport constitue la connexion entre les opérations unitaires. Selon leurs propriétés, on utilise différents appareils pour le transfert des solides, des liquides ou des gaz.

3.2.1 Transfert des matières solides

Le transport des matières solides peut être effectué par charges (d'une façon discontinue) ou d'une façon continue (un courant de matière sans interruption).

Pour le transport discontinu on utilise :

- des chariots,
- des élévateurs,
- des grues,
- des palans, etc.

Pour le transport continu, on utilise par exemple :

- le ruban roulant (Figures 3.2.1 et 3.2.2.),
- les transporteurs à chaîne (Figure 3.2.3),
- les transporteurs à vis (Figure 3.2.4),
- les rigoles secouantes ou vibrantes (Figure 3.2.5),
- les élévateurs (Figure 3.2.6),
- le transport pneumatique (Figure 3.2.7), ou
- le transport hydraulique

Figure 3.2.1
Ruban roulant

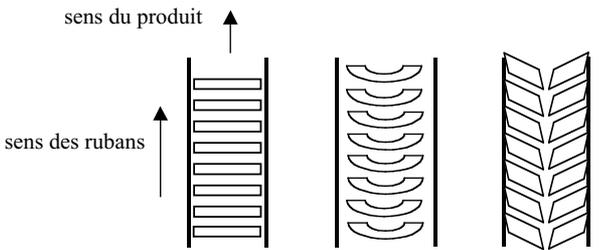
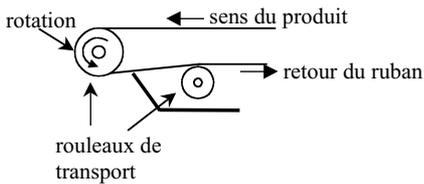


Figure 3.2.2
Profils des rubans
(vue d'en haut)

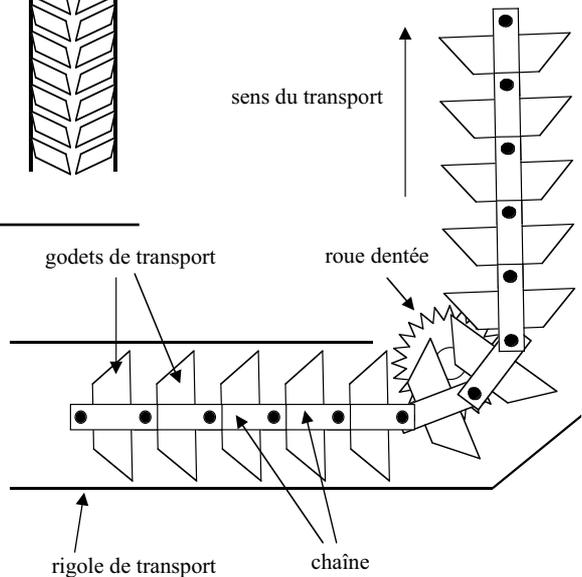


Figure 3.2.3
Transporteur à chaîne

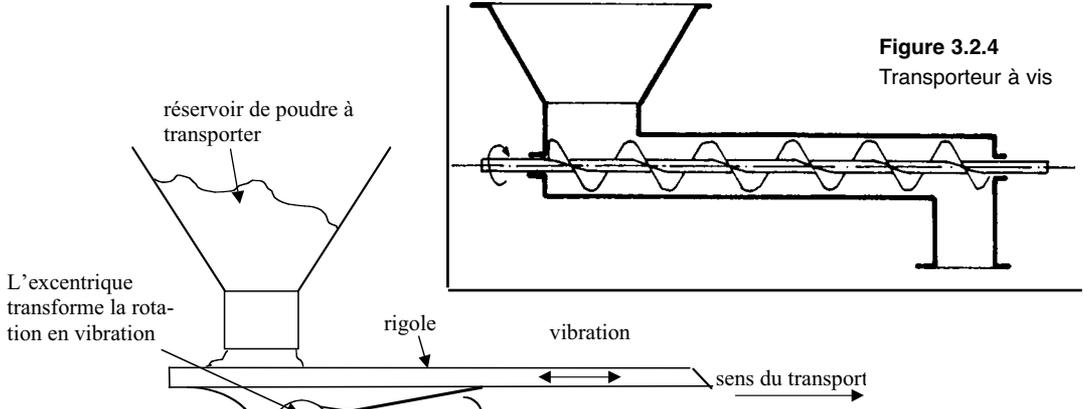


Figure 3.2.4
Transporteur à vis

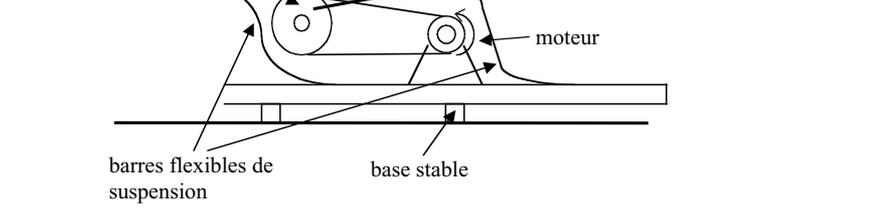


Figure 3.2.5
Rigole secouante

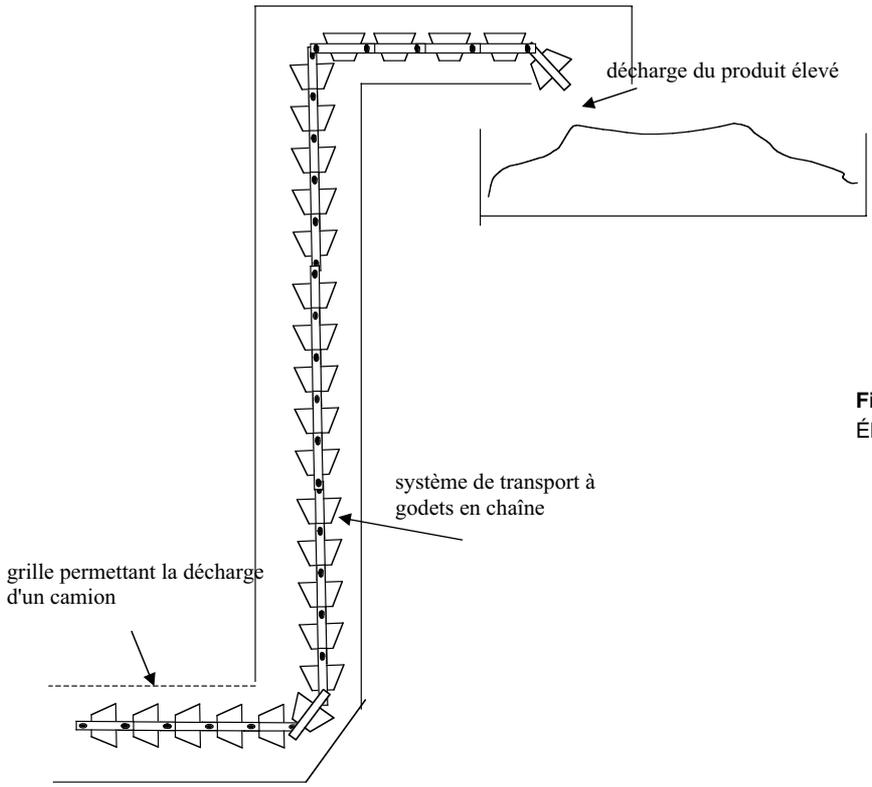
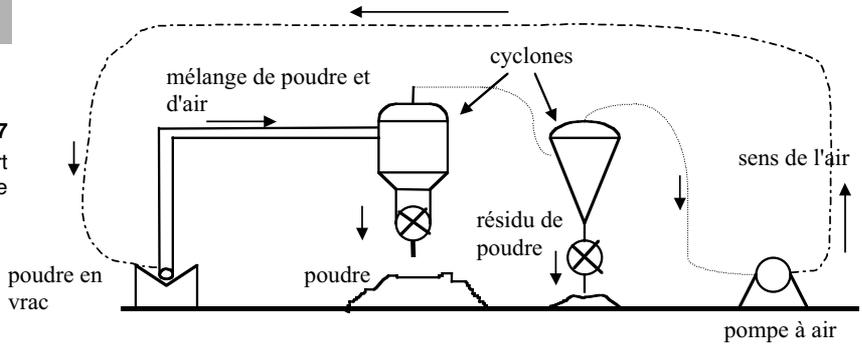


Figure 3.2.6
Élévateur

Figure 3.2.7
Transport
pneumatique



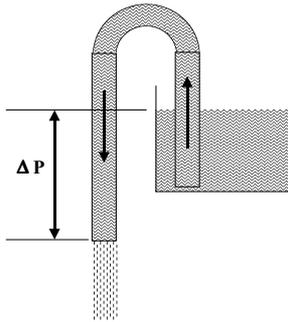
3.2.2 Transfert des liquides ou gaz

En raison de leur nature, les liquides et les gaz sont transportés par le courant à travers des tuyaux, des rigoles, des cuves, etc. Les courants sont créés par des pompes, soit de façon mécanique, soit par des gradients de pression.

Pompes non-mécaniques :

En principe les liquides et les gaz peuvent être transportés par différence de pression hydrostatique ou par différence de pression de gaz. Le siphon (Figure 3.2.8) est un exemple de l'utilisation de ce principe.

Figure 3.2.8
Siphon
 ΔP = pression
hydrostatique



Pompes mécaniques :

On distingue différents systèmes :

- les pompes à piston (Figure 3.2.9),
- les pompes à rotation (Figures 3.2.10 et 3.2.11),
- les pompes à force centrifuge (Figure 3.2.12 et 3.2.13),
- ainsi que les propulseurs (Figure 3.2.14).

Figure 3.2.9
Pompe à piston

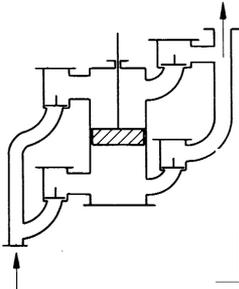


Figure 3.2.10
Pompe à rotation

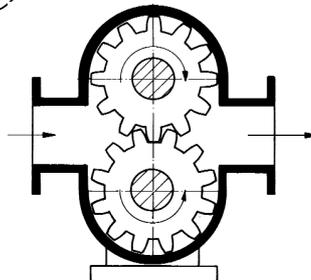
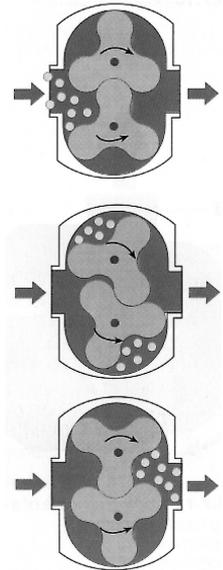


Figure 3.2.11
Principe d'une
pompe à lobes



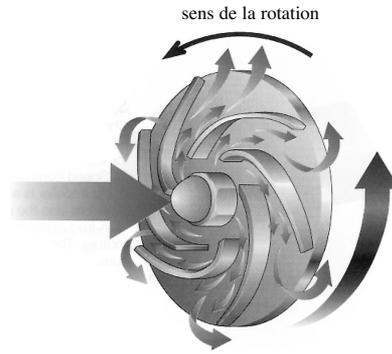
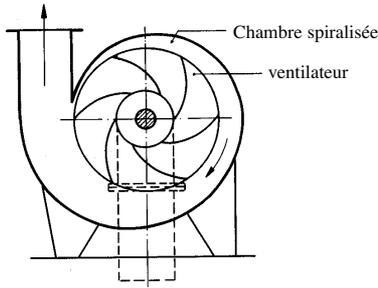


Figure 3.2.12
Pompe à force centrifuge

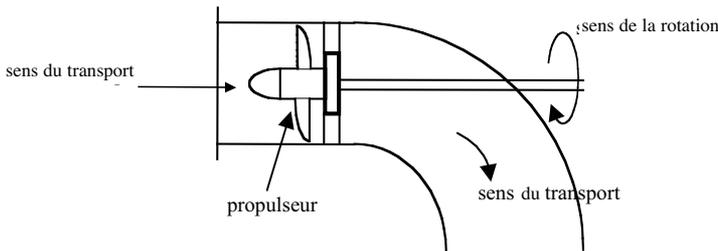
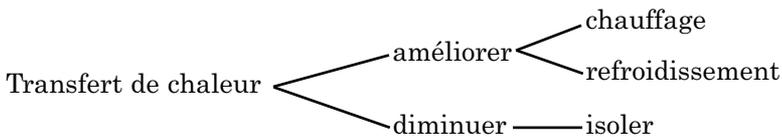


Figure 3.2.13
Principe du courant dans une pompe à force centrifuge

Figure 3.2.14
Propulseur

3.3 Le transfert de chaleur

Le transfert ou transport de chaleur est très important pour le chauffage (transfert de chaleur à l'intérieur du produit), le refroidissement (transfert de chaleur du produit vers l'environnement) mais aussi pendant le stockage (quand on désire maintenir une température constante dans un produit inert, il faut éviter le transfert de chaleur). Par conséquent, dans certains cas on désire améliorer ou minimaliser ce transfert, comme l'illustre le schéma ci-dessous :



Pour le chauffage, le moyen le plus utilisé est la vapeur d'eau saturée. Le tableau 3.3.1 montre la relation entre la pression de vapeur saturée et sa température.

Le transfert de chaleur s'effectue toujours des zones de température élevée aux zones de température basse. On distingue 3 différents mécanismes de transfert :

- la conduction (surtout dans les matières solides),
- la convection (dans les liquides et les gaz) ou
- la radiation (ondes électromagnétiques, surtout à travers les gaz).

Tableau 3.3.1
Relation entre la température T (°C) et la pression absolue P (atm) de vapeur saturée

T	P
50	0,12578
60	0,2031
70	0,3177
80	0,4829
90	0,7149
100	1,0332
110	1,4609
115	1,7239
120	2,0245
125	2,3666
130	2,7544
140	3,635

3.3.1 Matières solides

Comme indiqué ci-dessus, le transfert de chaleur dans les matières solides est principalement par conduction. Toute matière est caractérisée par sa puissance de conductibilité λ (lambda) [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]. Plus la conductibilité est élevée, plus rapide sera le chauffage ou le refroidissement d'une matière. Le tableau 3.3.2. présente la conductibilité de quelques matériaux couramment utilisés.

La figure 3.3.1. illustre une situation de transfert de chaleur d'une zone à température élevée (T_1) vers une zone à température moins élevée (T_2). La distance entre les zones est d . La différence de températures est ΔT .

On définit maintenant le coefficient de transfert de la chaleur

$$k_c = \frac{\lambda}{d} [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}].$$

Tableau 3.3.2
Conductibilité (λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]) de quelques matières

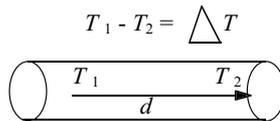
matière	λ
cuivre	349
aluminium	349
acier inoxydable	17,5
eau	0,6
bois	0,26 - 0,35
liège	0,035
air	0,026

k facilite le calcul de transfert de chaleur à travers une superficie donnée, d représente la distance, ou l'épaisseur de la matière.

Par exemple, prenons un rectangle de cuivre de hauteur 15 cm, de largeur 10 cm, et d'épaisseur 5 mm comme illustré sur la figure 3.3.2. Ce rectangle peut être une partie d'une boîte de conserve, ou une paroi d'une chambre climatisée.

Du côté A, la température est de 30 °C. Du côté B, la température est de 20 °C. Combien d'énergie passera à travers ce rectangle par heure?

Figure 3.3.1
La conduction de chaleur par les matières solides est causée par la différence de températures T_1 et T_2 aux endroits séparés d'une distance d



$$k_c = \lambda / d = 349 / 0,005 = 69.800 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

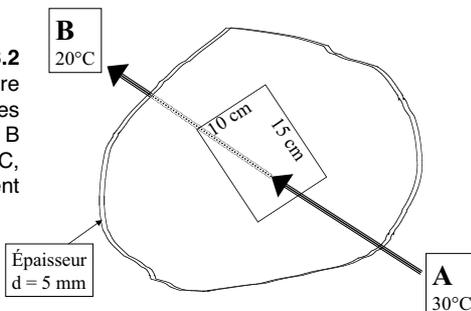
$$\text{superficie } 10 \times 15 \text{ cm}^2 = 150 \text{ cm}^2 = 0,015 \text{ m}^2$$

$$\text{La quantité d'énergie par heure} = Q = 69.800 * 0,015 = 1047 \text{ W}$$

$$\Delta T = 10 \text{ °C, soit au total}$$

$$10 * 1047 * 3,5993 = 37684 \text{ kJ}$$

Figure 3.3.2
Plaquette en cuivre séparant les endroits A et B à 30 °C et à 20 °C, respectivement



3.3.2 Transfert de chaleur à un liquide ou un gaz coulant

Quand on veut par exemple calculer le passage de la chaleur dans une boîte de sirop qui se trouve dans la vapeur, il faut compter avec le transfert de la chaleur de la vapeur à la paroi de la boîte, le passage au travers de la paroi de la boîte, le transfert de la paroi au sirop et ensuite le passage dans le sirop. La situation est illustrée sur la figure 3.3.3.

Dans ce cas, on a besoin du coefficient de transfert de la chaleur k_c [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$] d'un gaz ou d'un liquide vers une matière solide.

Calculons le transfert de chaleur avec les données suivantes :

$$k_{c1} (\text{vapeur} \rightarrow \text{paroi}) = 5815 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

$$T_1 \text{ vapeur} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lambda (\text{acier inoxydable}) = 17,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$d = 1 \text{ mm}$$

$$k_{c2} (\text{paroi} \rightarrow \text{sirop}) = 290 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

$$T_2 \text{ sirop} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

Le coefficient de transfert k_{total} est calculé selon la formule suivante :

$$\frac{1}{k_{\text{total}}} = \frac{1}{k_{c1}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{k_{c2}} \longrightarrow \frac{1}{k_{\text{total}}} = \frac{1}{5815} + \frac{0,001}{17,5} + \frac{1}{290} = 0,0001719 + 0,000057 + 0,0034 = 0,00367$$

Maintenant, on connaît le coefficient de transfert total de chaleur $k_{\text{total}} = 1 / 0,00367 = 271,96 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Ensuite on substitue les données connues :

$$T_1 - T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C} = \Delta T$$

Disons que la superficie de la boîte = $0,050 \text{ m}^2$

(un exemple du calcul est présenté ci-dessous)

Prenons une période de 5 minutes = $0,0835 \text{ heure}$

Dans ce cas, le transfert total de chaleur sera :

$$Q = 271,96 * 50 * 0,050 * 0,0835 = 56,77 * 3,5993 = 204,330 \text{ J}$$

La capacité de chaleur (c_{ch}) est définie comme la quantité d'énergie nécessaire pour une augmentation de température d'un degré Celcius $^\circ\text{C}$ [$\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$].

Quand $c_{\text{sirop}} = 6000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la boîte contient 850g de sirop, la température du sirop sera augmentée de $204330 / 6000 * 0,85 = 40,06 \text{ }^\circ\text{C}$, jusqu'à $(70 + 40,06) = 110,06 \text{ }^\circ\text{C}$.

On connaît deux types de courant de liquide ou de gaz :

- Laminaire (par couches), et
- Turbulent (tourbillonnant).

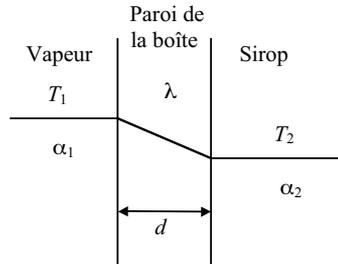


Figure 3.3.3

Modèle d'une paroi de boîte de conserve remplie de sirop, se trouvant dans la vapeur

Le coefficient k_c varie beaucoup selon le type de courant; par exemple quand on a un courant turbulent, k_c peut être 200 fois plus grand qu'avec un courant laminaire (toute chose étant constante par ailleurs). Quelques exemples sont donnés au tableau 3.3.3.

liquide ou gaz	courant	
	laminaire	turbulent
air courant/paroi	11,6	116,3
eau courante/paroi	581,5	5815
eau bouillante/paroi	2326	6978
vapeur condensante/paroi	5815	17445

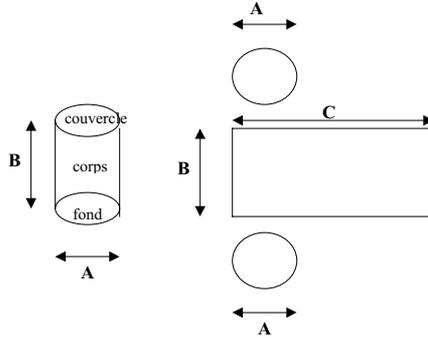
Tableau 3.3.3
Transfert de chaleur (k [$W.m^{-2}.K^{-1}$]) des liquides ou gaz sur une surface solide

On utilise beaucoup d'appareils dans lesquels on chauffe ou refroidit un liquide ou un gaz courant à l'aide d'un autre

liquide ou gaz. Ces appareils sont appelés échangeurs de chaleur. On les rencontrera dans la prochaine section.

Comment calculer la superficie d'une boîte ? Une boîte de conserve est composée d'un corps cylindrique, un fond et un couvercle (Figure 3.3.4.). Le corps cylindrique est, en effet, un rectangle. Alors, on calcule le total des superficies des deux cercles identiques et un rectangle, par exemple :

Figure 3.3.4
Calcul de superficie d'une boîte de conserve



couvercle (= fond) :

$$\begin{aligned} \text{diamètre} &= A \\ \text{rayon} &= 0,5 A \\ \text{superficie} &= \pi 0,25 A^2 \\ \text{circonférence} &= \pi A \end{aligned}$$

corps cylindrique (= rectangle) :

$$\begin{aligned} C &= \text{circonférence couvercle} = \pi A \\ \text{superficie} &= \pi AB \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{superficie totale} &= 2 (\pi 0,25 A^2) + \pi A B \\ &= \pi A (0,5 A + B) \end{aligned}$$

Alors une boîte de diamètre de 10 cm et de hauteur de 11 cm aura une superficie de 0,050 m² (résultat arrondi)

3.4 Le mélange

3.4.1 Matières sèches en poudre

On rencontre les poudres rarement dans l'industrie alimentaire, sauf quelques exemples comme le lait en poudre, les farines, le mélange de thé, le potage sec, ou les concentrés de vitamines. En principe, il existe 2 types de mélangeurs :

- les mélangeurs à rotation (Figure 3.4.1), dans lesquels les poudres sont mélangées par le mouvement du vaisseau;
- les mélangeurs stationnaires avec vis rotative (Figure 3.4.2); dans ce cas le vaisseau est stationnaire et les poudres sont mélangées par la vis.

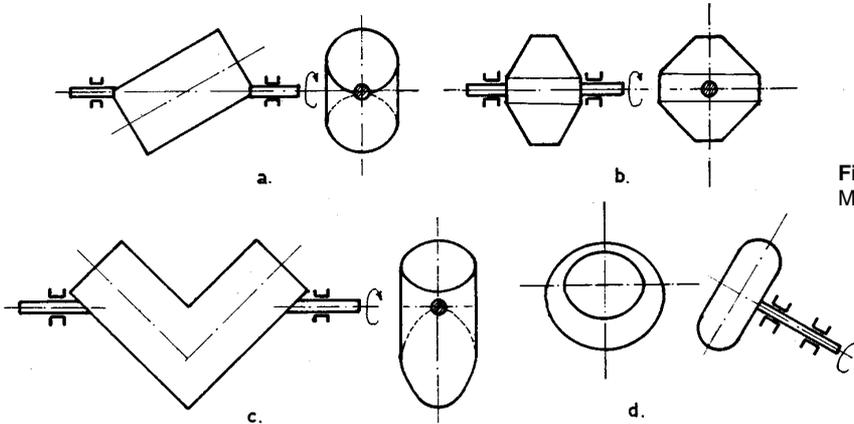


Figure 3.4.1
Mélangeurs à rotation

3.4.2 Deux ou plus de deux matières, dont au moins un liquide ou un gaz

Cette situation est très répandue et donc très importante. L'opération de mélanger peut avoir divers buts :

- Moyen pour divers traitements : dissoudre, extraire, distiller, sécher.
- Améliorer le transfert de chaleur.
- Accélérer les réactions chimiques.
- Préparation d'émulsions, pâtes, etc.

Le mélange de diverses matières peut être réalisé par deux principes :

3.4.2.1 Par courant :

- injection d'un ingrédient, causant une turbulence (Figure 3.4.3),
- dans les pompes et les propulseurs, où on combine le transport et le mélange,
- atomisation (Figure 3.4.4) ce qui résulte en un brouillard ou aérosol de gouttes de liquide dispersées en phase gazeuse

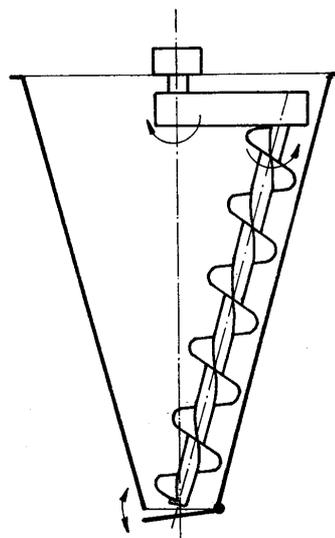


Figure 3.4.2
Mélangeur avec vis rotative

3.4.2.2 Par agitateurs :

Le mélange par agitateur est utilisé quand on fait la production en charges, et quand les ingrédients ne sont pas endommagés par l'agitation. On distingue plusieurs types d'appareils qui sont souvent assez spécifiques pour certains produits :

- divers types d'agitateurs (Figure 3.4.5), comme utilisés dans les fermenteurs et autres réacteurs;
- des pétrisseurs (Figure 3.4.6), par exemple pour les pâtes de boulangerie;
- des agitateurs à hélice (Figure 3.4.7) : on les utilise pour divers buts ;
- des agitateurs à turbine (Figure 3.4.8), pour renforcer l'effet des agitateurs montrés sur la figure 3.4.5;
- des vibreurs (Figure 3.4.9), très efficaces ; et quand même, ils ne causent pas beaucoup de dommage mécanique aux ingrédients.

Note : L'opération de mélanger se combine souvent avec le transport et/ou la réduction de la taille de matières.

Figure 3.4.3
Mélange par injection

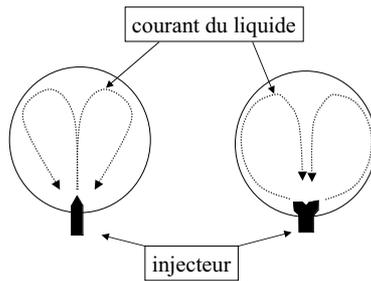


Figure 3.4.4
Atomisation (droite)

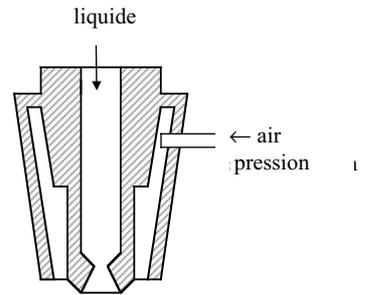


Figure 3.4.5
Agitateurs

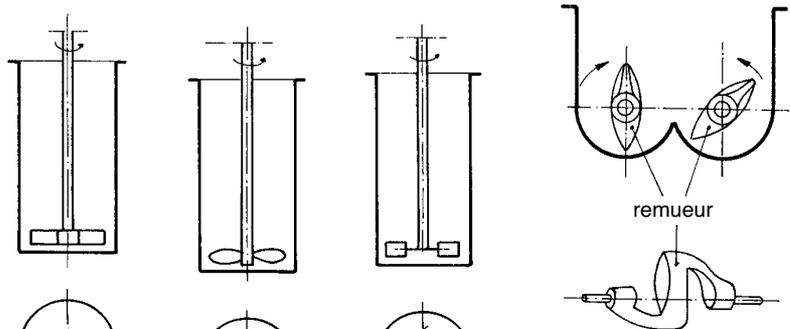
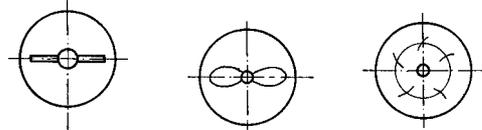


Figure 3.4.6
Pétrisseur (droite)



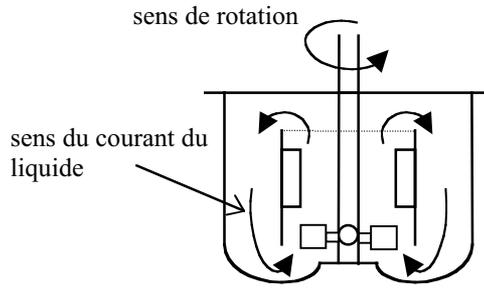
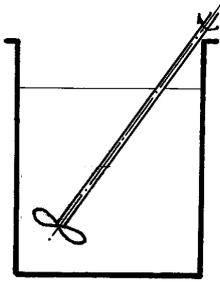


Figure 3.4.7
Agitateur à hélice
(gauche)

Figure 3.4.8
Agitateur à turbine

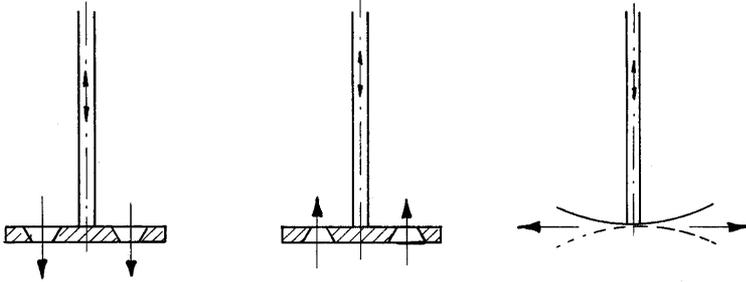


Figure 3.4.9
Vibreurs

3.5 La séparation

Comme le mélange, la séparation est une opération très importante dans les procédés de transformation et de conservation alimentaire. Le tableau 3.5.1. résume les catégories de séparations des phases gazeuses, liquides ou solides.

Ensuite le tableau 3.5.2. présente un certain nombre d'exemples pratiques d'opérations de séparation.

Dans cette section, on fera la distinction entre les séparations mécaniques et les séparations faites par transfert de chaleur.

	gaz	liquide	solide
gaz	condensation		
liquide	sédimentation	centrifugation séparation par membrane distillation	
solide	sédimentation	sédimentation filtration centrifugation pressage séparation par membrane évaporation concentration séchage cristallisation	tamissage sédimentation pneumatique

Tableau 3.5.1
Catégories de séparations des phases

Tableau 3.5.2 Techniques de séparation et d'extraction

Opération	Produit concerné	Objectif	Type d'équipement
égrenage, battage	céréales en épi (maïs, riz, mil, sorgho); légumineuses en gousses	détacher les grains de l'épi, séparer les grains des gousses	battage au gourdin, égreneuses et batteuses manuelles ou à moteur
décorticage	mil et sorgho : systématique maïs : parfois riz : avec ou sans étuvage préalable café, cacao, etc.	enlever le péricarpe du grain (cellulosique dur)	pilon et mortier (sur grains secs ou humides), décortiqueuse à meules, à cylindre métallique ou à rouleau de caoutchouc
broyage, dépulpage	fruits, grains céréales, légumineuses, café, cacao;	réduire la pulpe ou le grain (sec ou humide) en particules plus ou moins fines pour en faciliter la préparation ultérieure; obtenir semoule, farine, pâte, etc.; jus, sauce, nectar;	pilon et mortier broyeurs ou moulins : - à meules - à marteaux dépulpeur à fruits
	canne à sucre	écraser la tige de la canne pour en extraire le jus	moulin à canne à cylindres verticaux ou horizontaux
râpage	racines, tubercules, noix de coco, betteraves à sucre	réduire la pulpe en petits morceaux afin de faciliter un traitement ultérieur, comme séchage, extraction, fermentation, etc.	râpe manuelle (plaque trouée); râpe mécanique
pressage	graines et fruits oléagineux (arachide, coton, tournesol, palme, etc.), en transformation secondaire manioc, fromage, etc.	exercer une pression sur le produit pour en extraire le liquide (aqueux ou huileux)	presse à poids, presse à vis, presse hydraulique
filtration	tous produits liquides, par exemple jus de fruits, de canne, vinaigre, etc.	séparer les particules solides d'un liquide en le faisant passer au travers d'un filtre	filtre en toile, cellulose, sable, charbon actif, etc.
diffusion	sucre de betterave (solvant = eau), huile de soja, d'arachide, de colza, etc. (solvant = hexane)	extraire un produit (sucre, huile) d'un solide en le mettant en contact avec un liquide (un solvant)	diffuseur
centrifugation	lait/crème, jus d'agrumes/huiles essentielles, cristaux de sucre, etc.	séparer deux composants d'un produit grâce à leur différence de densité en les soumettant à une force centrifuge	centrifugeuse
distillation	à partir de jus alcoolisé (vin, chicha, jus de canne, eau de vie, rhum, saké) huiles essentielles de jus de fruits (agrumes, etc.)	extraire les composants les plus volatiles (alcool, huiles essentielles) d'un liquide en le chauffant: évaporation des composants plus volatiles que l'eau et condensation	alambic, colonne de distillation
décantation, sédimentation	amidon de manioc, eaux usées, jus de canne	séparation des composants de densités différentes selon leur vitesse de décantation dans un fluide (air, eau, ...) grâce à leur sédimentation	bassin de décantation
tamissage	farines, semoules, etc.; pulpe de fruits	séparation de particules en fonction de leur taille au moyen d'un tamis à maille plus ou moins serrée	tamis en tôle perforée ou grillagée
épluchage	manioc; divers racines et tubercules; fruits et légumes	ôter l'écorce flexible enveloppant la racine ou le fruit par action mécanique	manuel : machette, couteau éplucheur; éplucheuse motorisée à friction ou à abrasion

3.5.1 Séparation mécanique

3.5.1.1 Tamisage

(séparation solide-solide selon la grandeur des particules, grandeur minimale 50 μm).

à rotation : tamis cylindrique (Figure 3.5.1),

tamis plats : mouvement soit horizontal (Figure 3.5.2), soit vertical.

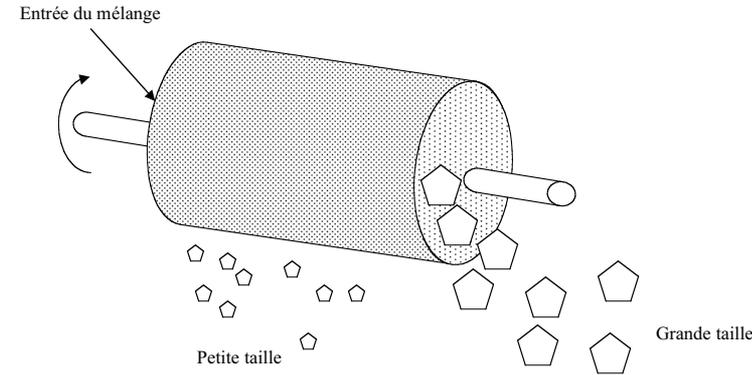


Figure 3.5.1
Tamis cylindrique

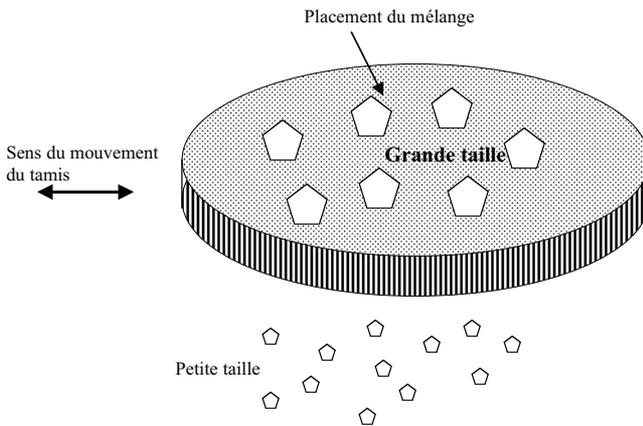


Figure 3.5.2
Tamis plat horizontal

3.5.1.2 Sédimentation

Séparation des particules solide-solide selon la grandeur des particules ou selon le poids spécifique :

- hydraulique (hydrocyclone) (Figure 3.5.3), les particules solides sortent par le purgeur et l'eau sort par le débordement;
- hydraulique (Figure 3.5.4) : les particules solides sortent sous forme de suspension concentrée par le fond et l'eau par le débordement;
- pneumatique (vanneuse) (Figure 3.5.5) : l'air emporte les particules légères le plus loin possible;
- chambres à poussière (Figure 3.5.6) : la poussière se dépose dans le fond

• séparation pneumatique par critères extérieurs (Figure 3.5.7) ; par exemple les grains de café verts sont reconnus par un capteur photoélectrique et séparés des grains mûrs par un jet d'air.

Figure 3.5.3
Hydrocyclone

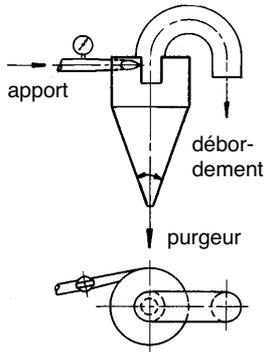


Figure 3.5.4
Réservoir à sédimentation

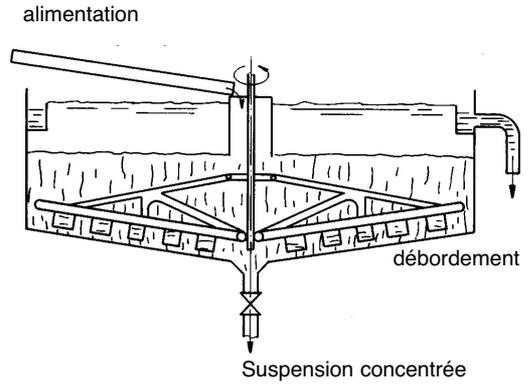


Figure 3.5.5
Vanneuse

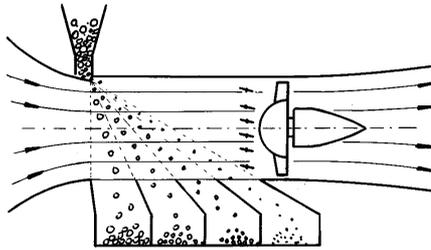


Figure 3.5.6
Chambres à poussière

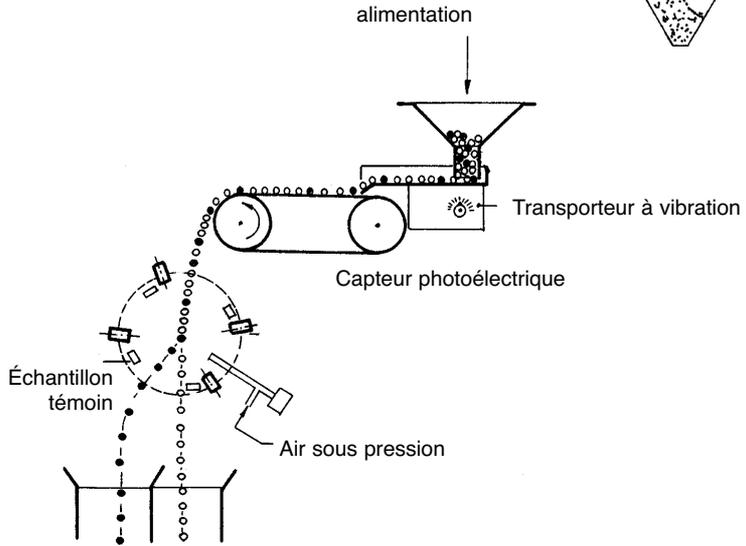
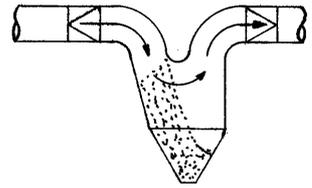


Figure 3.5.7
Classification pneumatique

3.5.1.3 Filtration (séparation solide-liquide à l'aide d'un milieu de filtration poreux)

On adapte la porosité du milieu de filtration à la grandeur des particules qu'on veut filtrer.

On peut filtrer en utilisant :

- la pression,
- la force de gravité (filtre en papier dans un entonnoir),
- le vide (Figure 3.5.8) : les particules solides sont aspirées sur la superficie du filtre. Le liquide traverse le filtre, entre les sections 1-5 et est évacué par les décharges B (centre). La matière solide est lavée au niveau des sections 7-8, pressée pour enlever l'eau de lavage, et enlevée par le racloir.

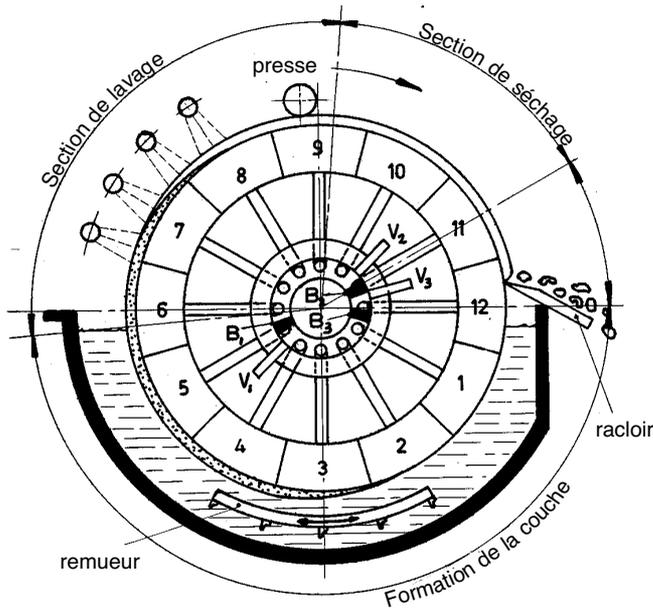


Figure 3.5.8
Filtre à vide

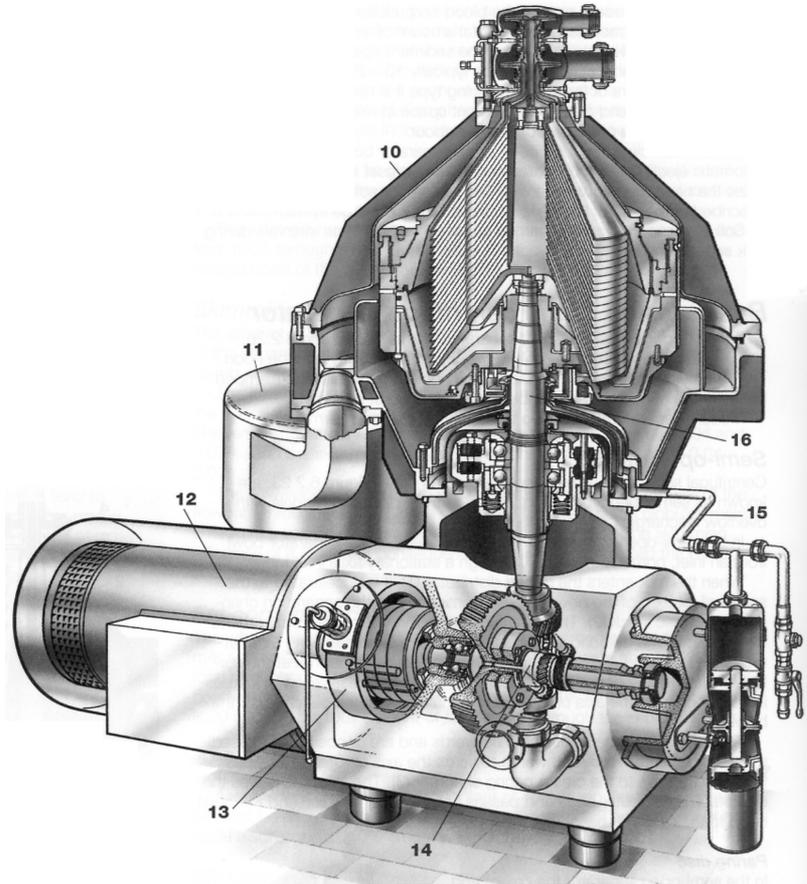
3.5.1.4 Centrifugation

En créant des forces centrifuges, on accélère la sédimentation des particules solides. En fait, il ne s'agit pas d'une vraie méthode de séparation; on utilise la centrifugation (Figure 3.5.9) pour accélérer par exemple la filtration et la sédimentation. Cependant, c'est une technique que l'on utilise fréquemment dans l'industrie alimentaire.

3.5.1.5 Pressage (séparation liquide-solide)

Quand on a beaucoup de solide et peu de liquide, la pression peut être avantageuse. Par exemple on utilise la pression pour l'extraction des jus de pommes et d'autres fruits. Quand on applique des pressions élevées, une déformation des cellules peut avoir lieu; dans ce cas on sépare le contenu des cellules des parois cellulaires.

Figure 3.5.9
Centrifugeuse
hermétique



- | | |
|------------------------------------|-------------------------------|
| 10. Couvercle | 14. Boîte de vitesse |
| 11. Cyclone à décharge du sédiment | 15. Système d'eau d'opération |
| 12. Moteur | 16. Essieu creux |
| 13. Frein | |

3.5.1.6 Séparation par membrane

La technologie de séparation par membrane est appliquée au niveau moléculaire ou ionaire.

Osmose inverse (OI) :

La concentration des solutions par l'enlèvement d'eau.

Nano-Filtration (NF) :

La concentration des substances organiques par l'enlèvement partiel des ions monovalents comme Na^+ ou Cl^- (déméralisation partielle).

Ultra-Filtration (UF) :

La concentration des grandes molécules et macromolécules.

Micro-Filtration (MF) :

Enlèvement des bactéries, séparation des macromolécules.

Quelques applications dans l'industrie laitière sont groupées dans le tableau 3.5.3.

Tableau 3.5.3
Application de la séparation par membrane dans l'industrie laitière

Taille de matière [µm]	0,0001	0,001	0,01	0,1	1,0	10	100
Masse moléculaire [D]	100	1000	10.000	100.000	500.000		
Caractéristiques des particules	ionique	moléculaire	macro-moléculaire		cellulaire + microparticulaire		
Composants du lait	ions		protides du petit lait		globules des lipides	levures, champignons	
	sels		micelles de caséine		bactéries		
	lactose	vitamines	agrégats des protides du petit lait, résidus de fromage				
Procédé de séparation	OI	UF				Filtration traditionnelle	
		NF			MF		

3.5.2 Méthodes de séparation à l'aide de transfert de chaleur

3.5.2.1 Évaporation et concentration

(séparation solide dissout du solvant liquide)

Par exemple, pour la fabrication du lait concentré, et la purée de tomates.

3.5.2.2 Séchage (séparation solide-liquide)

Le but du séchage est d'obtenir la matière solide pour avoir une plus longue durée de conservation et des produits qui sont plus faciles à emballer, avec un transport bon marché. Le séchage sera traité plus en détail au chapitre 4.4.

3.5.2.3 Cristallisation

(séparation solide-liquide par retrait de chaleur)

C'est rarement appliqué dans l'industrie alimentaire, sauf la sucrerie (cf. chapitre 6.6.)

3.5.2.4 Distillation (séparation liquide-liquide)

La distillation ne sera pas traitée en détail. On l'applique pour la purification des substances volatiles comme les arômes, les alcools, etc.

3.5.2.5 Condensation (séparation gaz-gaz)

La condensation ne sera pas traitée en détail. Comme la distillation, on l'applique pour la purification des substances volatiles comme les arômes, etc.

3.5.2.6 Extraction

(Séparation d'une matière bien soluble d'une matière peu soluble à l'aide d'un solvant)

C'est une opération appliquée pour la préparation de l'extrait de café, pour l'extraction d'huile d'arachide ou de palme (chapitre 6.4), et pour l'extraction de sucre à partir des cannes (chapitre 6.6).

3.6 La réduction de taille

La plupart des aliments et des ingrédients alimentaires sont hétérogènes et contiennent des particules de tailles diverses. La réduction de taille des matières est pratiquée pour de nombreuses raisons. Par exemple :

- les dimensions de la matière ne conviennent pas à la consommation
- pour obtenir un produit homogène, on le réduit en petits morceaux ou en pâte ou en émulsion
- pour mieux mélanger avec d'autres ingrédients
- pour mieux faire l'extraction, etc. etc.

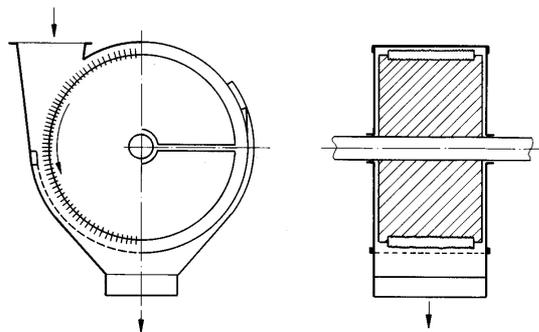
En fait, moudre c'est réduire le produit entier sans séparation de certaines parties. Le tableau 3.6.1 présente divers appareils que l'on utilise pour la réduction de taille. Leurs effets sur la matière peuvent varier selon qu'il s'agit de couper, de frapper, de tirer, etc. en fonction de la nature physique des matières à réduire.

Les diverses figures 3.6.1 - 3.6.11 sont résumées dans ce tableau :

Tableau 3.6.1
Divers appareils
de réduction de
matières

Type de machine	Figure	Type d'action	Type de produits
coupeuse	3.6.1		matière fraîche
hachoir	3.6.2	couper	humidité élevée
râpeuse	3.6.3		(manioc, betteraves, légumes, fruits)
moulin frappant	3.6.4	frapper	produits plus ou moins secs
moulin à marteaux	3.6.5		(grain de blé, graine d'arachide)
désintégrateur	3.6.6	frapper déchirer tirer	produits fibreux (canne à sucre)
moulin "attrition"	3.6.7	broyer	souvent des pâtes
meules	3.6.8	moudre très	(masse de chocolat)
kollergang	3.6.9	finement	
rouleaux (cylindres)	3.6.10	broyer presser	graines d'huile graines de cacao
homogénéisateur	3.6.11	pression hydraulique	lait émulsions

Figure 3.6.3
Râpeuse



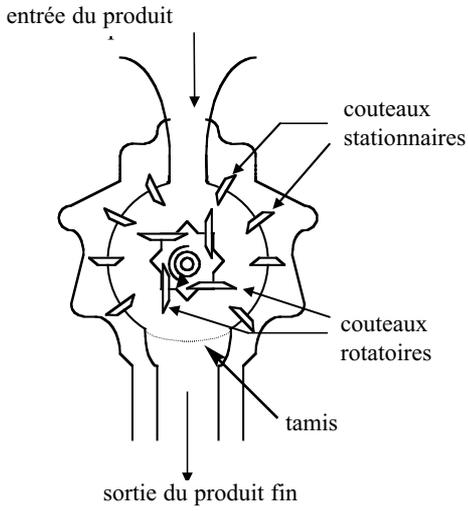


Figure 3.6.1

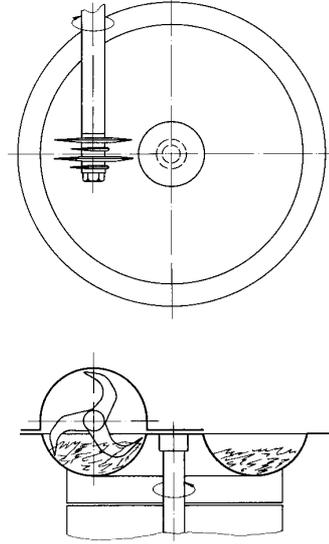


Figure 3.6.1
Coupeuse

Figure 3.6.2
Hachoir

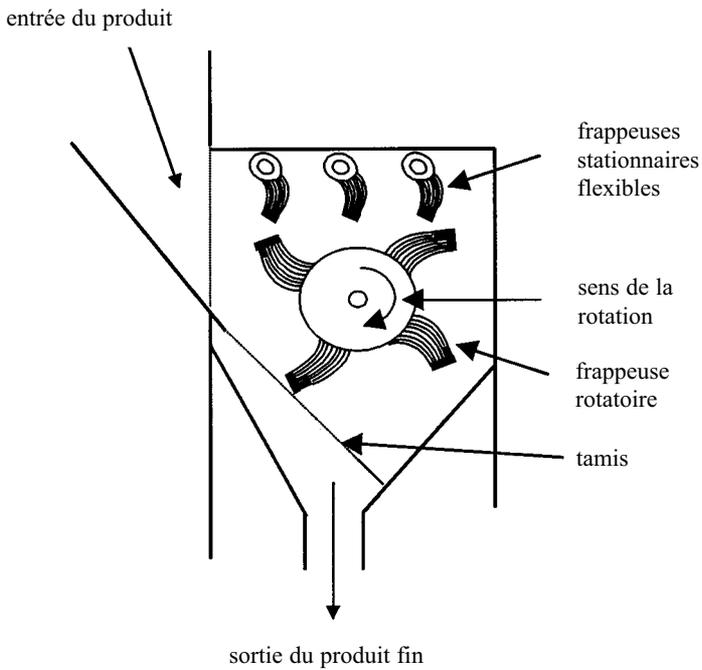


Figure 3.6.4
Moulin frappant

Figure 3.6.5
Moulin à marteaux

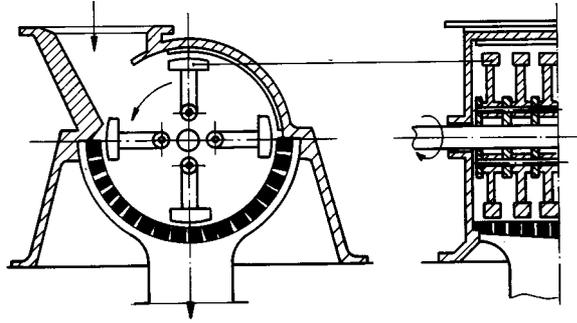


Figure 3.6.6
Désintégrateur

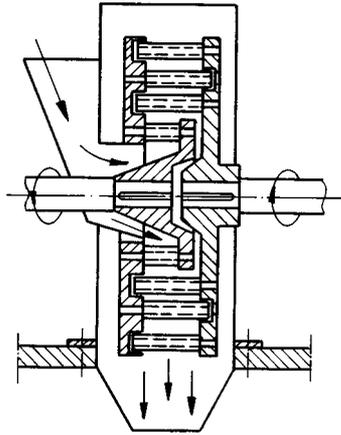


Figure 3.6.7
Moulin « attrition »

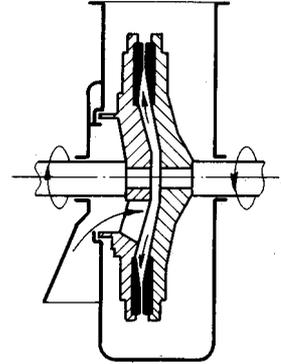
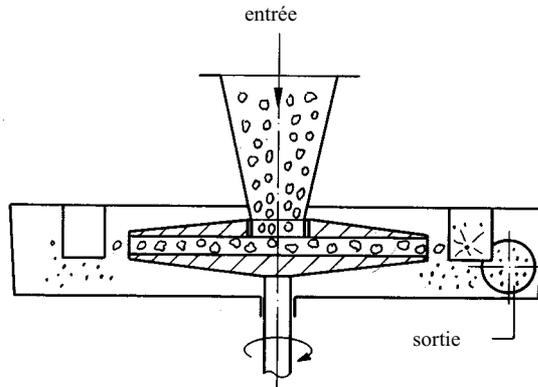


Figure 3.6.7

Figure 3.6.8
Meules



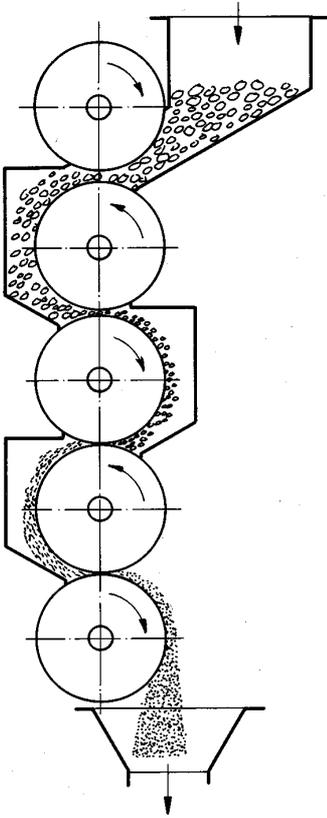


Figure 3.6.10
Moulin à cylindres

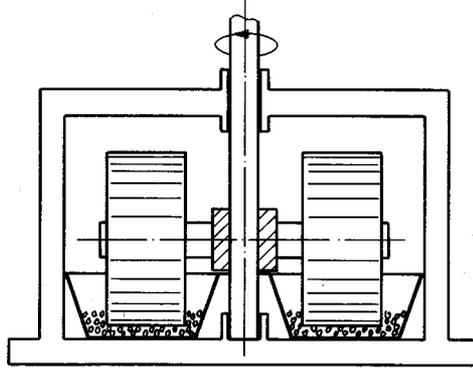


Figure 3.6.9
Kollergang

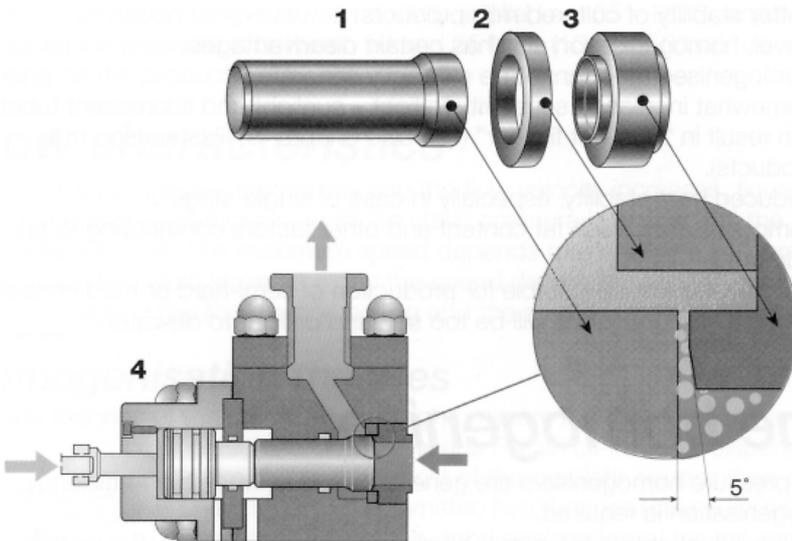


Figure 3.6.11
Les composants
d'un homogénéisa-
teur à action uni-
que (1) Forceur,
(2) Anneau de colli-
sion (impacte),
(3) Siège,
(4) Presse hydro-
lique

3.7 L'emballage des aliments

3.7.1 Introduction

Tout au long de la filière, au cours des étapes de transport, de stockage, de commercialisation, les aliments sont le plus souvent protégés par un conditionnement qui les met à l'abri des chocs mécaniques, de la contamination microbienne ambiante, parfois de l'air, de la chaleur, de la lumière, etc. L'emballage donne une présentation valorisante. La figure 3.7.1 résume les rôles de l'emballage.

Figure 3.7.1
Rôles de
l'emballage

Maintien des éléments de l'aliment entre eux

Protection, suivant les cas, contre :

- l'air, l'humidité
- les gaz
- les solvants
- les micro-organismes
- les insectes et les rongeurs
- la lumière (y compris les ultra-violets)
- les chocs, l'écrasement...
- la dégradation du produit (rancissement, oxydation, effritement, autolyse)

Mise en valeur du produit :

- visibilité
- esthétique
- information (étiquetage, mode d'emploi, qualité...)
- publicité sur le lieu de vente

Les matériaux utilisés pour l'emballage des aliments sont extrêmement divers. Ils sont choisis en fonction du problème à résoudre, de l'aliment lui-même et des contraintes locales. Le choix de l'emballage en fonction du produit et de son environnement nécessite la prise en compte de données telles que :

- les risques d'altération et les conditions de stockage (exigences du point de vue microbiologique, organoleptique, (bio)chimique, physique, a_w , sensibilité à l'oxydation);
- les interactions entre le produit et son contenant (passage dans l'aliment de certains composés de matériaux d'emballage, ou passage de composés volatils à travers l'emballage);
- la composition chimique des matériaux d'emballage et leur perméabilité (à l'humidité, à l'oxygène);
- les demandes spécifiques pour le produit et l'emballage (ayant pour cible les consommateurs).

Quelques exemples d'emballages utilisés fréquemment sont les caisses en bois ou les paniers tressés pour les fruits, les jarres en terre pour le stockage des olives, les feuilles de bananier ou de maïs pour envelopper le fromage ou la pâte de manioc, les bocaux en verre, etc. Tous ces emballages remplissent leur fonction depuis fort longtemps. Le développement plus récent des boîtes de conserves métalliques, puis des matières plastiques et des matériaux complexes a permis de nouvelles fonctions : conserves appertisées, briques de lait UHT, boîtes de boissons gazeuses, etc.

On peut généralement diviser les matériaux d'emballage en 2 groupes :

- l'emballage qui a pour but de former des unités de transport sans fournir une protection contre la détérioration. Exemples : caisses en bois, caisses en carton, sacs en tissu, etc.
- l'emballage qui protège le produit contre la détérioration et qui forme la plus petite unité de vente.

Nous nous limiterons à l'étude du deuxième groupe, qui comporte comme emballages les plus importants :

- les boîtes de conserve en fer blanc,
- les récipients en verre,
- les emballages qui sont utilisés pour les produits séchés.

On verra que tous les types d'emballages ont leurs avantages et leurs inconvénients spécifiques. Une comparaison générale de quelques emballages (tableau 3.7.1) montre clairement l'influence du type d'emballage sur les frais de transport.

Type d'emballage	Capacité (litres)	Poids (g)	Poids de transport (g)	Poids de transport/capacité	Volume de transport (l)	Volume de transport/capacité
Bouteille Coca-Cola	0,33	435	765	2,32	0,94	2,85
Bouteille Vichy	0,33	350	680	2,06	0,91	2,76
Bouteille plastique (PVC)	0,33	40	370	1,11	0,66	2,00
Boîte en fer blanc	0,35	53	403	1,15	0,56	1,60
Boîte en aluminium	0,35	23	373	1,07	0,53	1,52

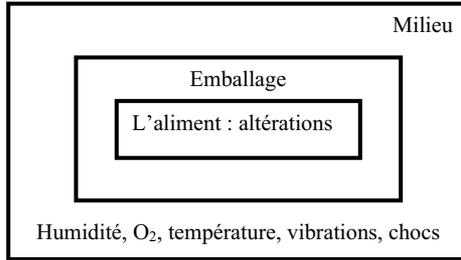
Tableau 3.7.1
Comparaison des poids et volumes de quelques emballages

Le choix de l'emballage se fait en fonction des objectifs, mais aussi des disponibilités et du coût. Souvent ce sont des contraintes dans les pays en développement où on ne trouve localement que quelques matériaux. Pour les emballages qui sont en contact direct avec l'aliment, il est indispensable de s'assurer de leur innocuité. Dans le cas des récipients métalliques, l'application d'un vernis intérieur permet d'éviter la corrosion et donc le passage d'étain et de plomb dans l'aliment, surtout quand celui-ci a un pouvoir corrosif (présence de nitrates, de composés soufrés, de caramel, etc.).

Pour les emballages en plastique, il faut veiller à l'absence de monomères comme le chlorure de vinyle et éviter le passage dans

l'aliment de certains adjuvants de fabrication de la matière plastique qui pourraient être toxiques.

Figure 3.7.2
Fonctions de l'emballage



Même dans les pays où une législation stricte régit l'usage des matériaux de conditionnement, certains emballages potentiellement toxiques ou non hygiéniques sont parfois utilisés. Ainsi, des aliments vendus dans les

rues de certaines villes sont présentés dans des morceaux de sac de ciment de récupération et il existe en Asie des ateliers de récupération de sacs en plastique ensuite revendus après lavage et séchage.

Dans de nombreux pays, l'industrie plastique offre films, sacs, sachets à très bas prix, alors que les emballages en verre ou en métal sont rares et coûteux. Ceci ne va pas sans poser des problèmes pour l'environnement. La récupération des bouteilles en verre permet dans certains cas de réduire à la fois les coûts et les nuisances.

3.7.2 Boîtes de conserve

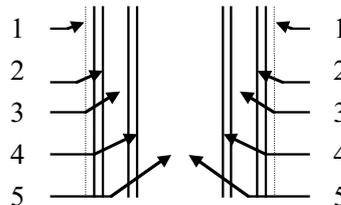
3.7.2.1 Matériaux et propriétés

La plupart des boîtes de conserves sont fabriquées à partir du fer étamé. Le fer étamé consiste en une plaque d'acier, couverte des deux côtés d'une mince couche d'étain. On distingue divers types de fer étamé suivant les méthodes utilisées pour appliquer la couche d'étain sur l'acier, l'épaisseur de la plaque d'acier, les couches d'étain. On distingue :

- le fer étamé à l'aide de chaleur,
- le fer étamé à l'aide d'un procédé électrochimique.

Le deuxième type de fer étamé se caractérise par des épaisseurs de la plaque d'acier et de la couche d'étain moindres que celles du premier type. La figure 3.7.3 donne une idée sur la composition et les dimensions d'une plaque de fer étamé.

Figure 3.7.3
Coupe transversale d'une plaque de fer étamé



1. Pellicule d'huile de palme 2.10^{-8} mm.
2. Pellicule d'oxyde d'étain (SnO), épaisseur 10^{-6} mm.
3. Couche d'étain, épaisseur de 0,000385 à 0,00206 mm.
4. Alliage $FeSn_2$, épaisseur 10^{-2} mm, protégeant de la corrosion.
5. Acier, épaisseur 0,2 - 0,3 mm.

Les ressources mondiales d'étain devenant limitées, on a cherché à produire du fer blanc sans utiliser de l'étain. Maintenant, on produit du fer blanc couvert de chrome. Contrairement au fer

étamé, il faut toujours couvrir le fer chromé d'une couche de laque, et ce, afin de protéger le chrome de la corrosion causée par les produits acides. L'autre raison de la couverture obligatoire du chrome est due à la toxicité du chrome.

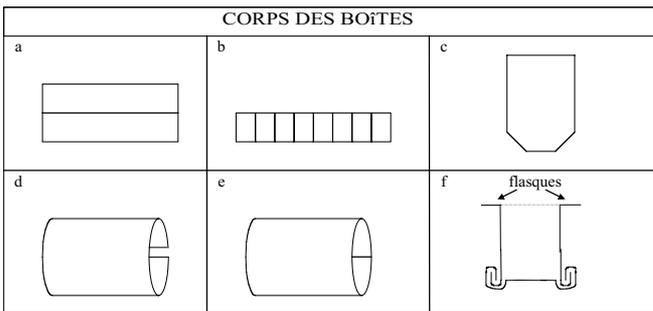
Une autre matière métallique utilisée beaucoup est l'aluminium. L'aluminium est cependant assez cher et peu solide. A cause de cela, on utilise de préférence des alliages d'aluminium plus résistants.

3.7.2.2 Fabrication des boîtes

La fabrication des boîtes comprend la fabrication des corps de boîtes et la fabrication des couvercles (couvercles et fonds sont les mêmes).

A partir des lames de fer étamé, on découpe (à l'aide d'une guillotine) des bandes de fer suivant la longueur (figure 3.7.4.a.). Ensuite, ces bandes sont découpées suivant les dimensions des boîtes avec un couteau à bandes multiples (figure 3.7.4.b.).

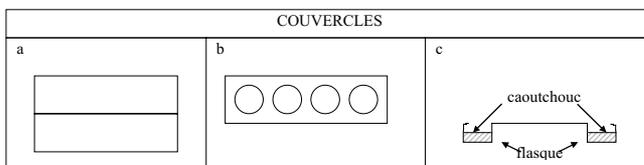
Puis, afin d'assurer un meilleur sertissage, on enlève les angles d'un côté de la lame du corps de la boîte (figure 3.7.4.c.). A l'aide d'une rouleuse, la forme de la boîte est ensuite déterminée (figure 3.7.4.d.), suivie par la soudure (figure 3.7.4.e.) des bouts de la lame de fer. Enfin, le flasque est formé (figure 3.7.4.f.).



Fabrication des corps de boîtes

Figure 3.7.4
Fabrication des boîtes de conserves

Par un découpage (figure 3.7.5.a.), des lames de fer - dont la largeur équivaut au diamètre des couvercles - sont formées. Ensuite, à l'aide d'une presse, on fait le découpage des couvercles (figure 3.7.5.b.). En même temps, par le découpage, on effectue la formation du flasque du couvercle. Enfin, le flasque est recouvert avec une couche de caoutchouc (figure 3.7.5.c) à l'intérieur et ce, afin d'assurer une bonne fermeture de la boîte.



Fabrication des couvercles.

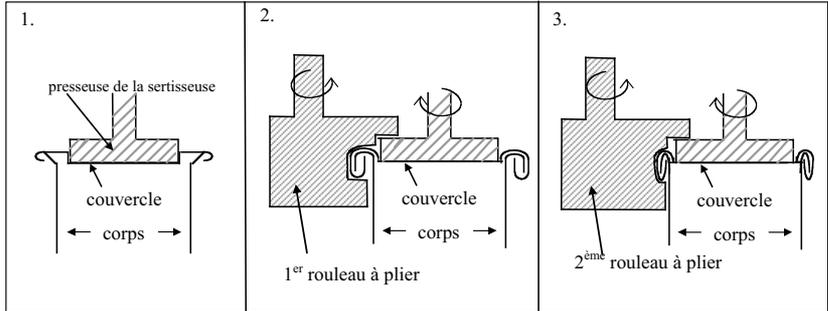
Figure 3.7.5
Couvercles

Le sertissage

Le sertissage comprend la fermeture des boîtes à l'aide d'une sertisseuse, qui connecte les couvercles avec le corps de la boîte. La moitié des couvercles est utilisée comme fonds de boîtes, l'autre moitié forme les couvercles.

Le dernier stade de fabrication des boîtes consiste à sertir le fond au corps de la boîte. Après le remplissage de la boîte, le couvercle est sertie avec la boîte de la même manière que le fond. La boîte est fermée avec un couvercle qui s'adapte parfaitement au flasque de la boîte. Ensuite, l'ensemble est tourné entre les deux rouleaux de la sertisseuse afin que les flasques du couvercle et du corps soient pliés ensemble (figure 3.7.6).

Figure 3.7.6
Le sertissage



La corrosion

La corrosion peut se définir comme l'ensemble des réactions chimiques entre le produit et la boîte elle-même. On peut classer la corrosion selon 3 groupes de réactions possibles :

- Dissolution de l'étain, qui a comme résultat la décoloration et l'augmentation de la concentration d'étain dans le produit.
- Attaque du fer. Le fer est dissout dans le produit. Parfois a lieu la formation d'hydrogène qui cause le "bombage chimique" des boîtes. Les autres phénomènes sont la perforation des parois et la formation de la rouille qui cause des décolorations.
- Décoloration de l'étain et du fer causée par des produits riches en soufre. Ces décolorations ne sont pas nuisibles à la santé, mais elles sont indésirables du point de vue esthétique.

On essaie de protéger les boîtes de conserve de la corrosion comme suit :

- En choisissant le type de fer étamé le plus approprié pour les produits donnés. Ici, les épaisseurs des couches de fer et d'étain sont des facteurs importants.
- Application d'une couche protégeant la laque. Les feuilles de fer étamé sont laquées avant d'être transformées en boîtes.
- L'extérieur des boîtes peut être protégé de la corrosion (rouille) par l'étiquetage ou par l'impression directe sur le fer étamé.

3.7.2.4 La mise en boîte

Après stérilisation, une bonne boîte de conserve est caractérisée par la présence d'un vide. Pour cette raison, le fond et le couvercle sont un peu creux. Pour obtenir un vide, il faut enlever les gaz présents dans le produit, avant le sertissage, par un procédé qui s'appelle l'exhaustion. L'exhaustion peut s'effectuer sous vide (les gaz sont enlevés par aspiration) ou bien, par un chauffage léger du produit qui provoque l'échappement des gaz. Immédiatement après l'exhaustion, qui a lieu quand les boîtes ont déjà été remplies, on effectue le sertissage, et, ensuite, la stérilisation. Les boîtes ne sont jamais remplies complètement ; il reste un espace vide qui s'appelle l'espace de tête. Le volume de l'espace de tête nécessaire est déterminé par les dimensions de la boîte. La fonction de cet espace est de fournir le vide après la stérilisation.

3.7.3 Les récipients en verre

3.7.3.1 Matériaux et propriétés

Le verre est une substance amorphe ; cela veut dire que le verre liquide ne s'est pas cristallisé pendant la solidification. La composition du verre la plus utilisée pour la fabrication des récipients est donnée au tableau 3.7.2.

Matériaux de base	Composition	
Sable	SiO ₂	72%
Pierre à chaux	CaO	11%
Soude	Na ₂ O	14%
Terre blanche	Al ₂ O ₃	1,7%
Provenant d'impuretés	MgO	0,3%
	K ₂ O	0,3%

Tableau 3.7.2
Composition du verre

Le plus souvent, on utilise du verre non coloré. Lors de la fonte des matériaux de base, on peut colorer le verre par addition de charbon, de soufre ou d'oxyde de magnésium, ce qui donne une couleur verte au verre.

Quelques unes des propriétés du verre sont :

- la transparence,
- la stabilité à la corrosion,
- la possibilité d'ouvrir et de refermer le récipient en verre,
- la dureté,
- l'imperméabilité aux gaz et à la lumière ultraviolette.

3.7.3.2 Fabrication du verre

La fonte du verre se fait dans un grand four à bassin (superficie 6 x 8 m, profondeur de 1 m) que l'on maintient à une température de 1400 - 1500°C à l'aide de brûleurs à gaz ou à huile. Les maté-

riaux de base sont mélangés et introduits dans le bassin. Ils flottent sur le verre liquide et sont ainsi exposés à la radiation directe des brûleurs. Le verre liquide qui est formé est transporté vers un réservoir à 1200°C qui assure l’approvisionnement de l’usine. Un système à ciseaux et à pinces fournit à l’usine de grandes gouttes de verre liquide. Ces gouttes sont introduites dans des moules métalliques qui ont exactement la forme du récipient désiré. Après la fermeture du moule, la goutte de verre est gonflée jusqu’au moment où la masse de verre possède la forme du moule. Ensuite, le récipient qui est déjà suffisamment rigide est enlevé du moule à 600°C et est introduit dans un tunnel de refroidissement. Là, il est refroidi selon un programme précis de refroidissement et ce, afin d’éviter la cristallisation du verre et la naissance de tensions internes qui affaibliraient le récipient.

3.7.3.3 Couverture de verre

Dans une industrie à grande capacité, les récipients ont une vitesse considérable sur les rubans de transport. Par le frottement des récipients les uns contre les autres et contre le système de transport, il se produit des rayures à l’extérieur des récipients. La présence de rayures amenant certains risques de casse pendant le traitement à chaud (stérilisation), on peut protéger le verre à l’aide d’une mince couche qui est très dure et qui améliore les propriétés de glissement.

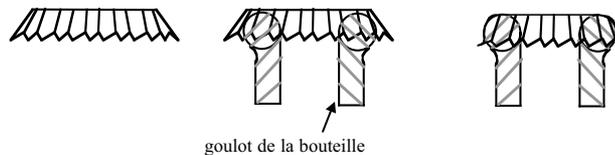
3.7.3.4 Fermeture des récipients

En général, on divise les récipients en verre en :

- bouteilles (à goulot étroit),
- bocaux (à goulot large).

La plupart des bouteilles sont fermées à l’aide de bouchons à capsule métallique (figure 3.7.7). La capsule consiste en un disque métallique dont les bords sont pliés. Cette capsule est munie d’un disque en liège, couvert de plastique, qui doit assurer une bonne

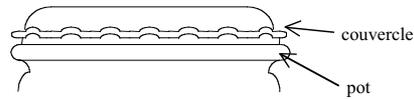
Figure 3.7.7
Capsule métallique



fermeture de la bouteille. D’abord, on place la capsule sur la bouteille, sous pression, afin que le disque en liège soit comprimé et ferme bien. Ensuite, les bords sont pliés autour du goulot de la bouteille. Les autres possibilités pour fermer les bouteilles sont : les bouchons en liège, les capsules plastiques, et les capsules à vis.

Les bocaux sont fermés à l’aide de divers types de couvercles, dont les plus connus sont :

- Le couvercle omnia. Ici, on a le même principe qu'avec une capsule métallique. Un couvercle en fer étamé laqué, muni



d'un anneau en caoutchouc ou en plastique, est placé sous pression sur le pot. Ensuite, les bords sont pliés contre le goulot à un certain nombre d'endroits (figure 3.7.8).

- Un autre couvercle populaire est le couvercle "Twist-off", qui est caractérisé par la présence d'un filetage partiel sur le goulot du pot (figure 3.7.9). En comparaison avec le couvercle Omnia, on peut mieux refermer le pot après usage.

Figure 3.7.8
Couvercle "Omnia"

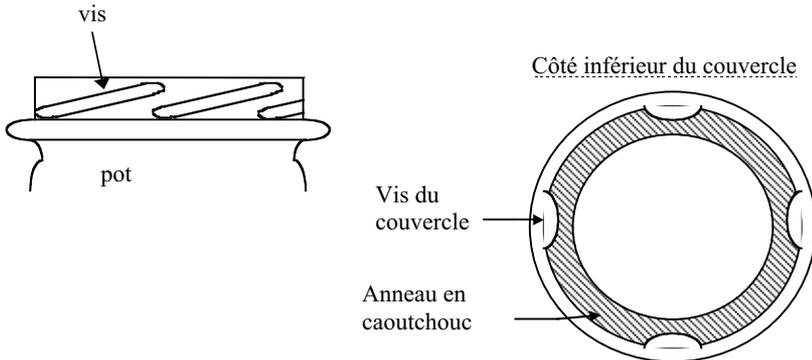


Figure 3.7.9
Couvercle "Twist-off"

3.7.4 L'emballage des produits séchés

Les facteurs jouant un rôle important contre la détérioration des produits séchés emballés sont la perméabilité à l'eau et à l'air. On cherche toujours des matériaux d'emballage qui soient imperméables à l'air et à l'humidité. Bien que l'on utilise dans certains cas des boîtes de conserve lors de l'emballage (lait en poudre, café en poudre), l'emploi de sachets en plastique est souvent meilleur marché. Avant d'utiliser un certain matériel pour l'emballage, on détermine sa durabilité ainsi que sa perméabilité. Le Tableau 3.7.3 offre quelques exemples de matériaux synthétiques qu'on utilise fréquemment pour emballer les aliments. On y trouve les caractéristiques, la durabilité, la perméabilité et les applications courantes. On n'a toujours pas trouvé de substances alliant à la fois une grande imperméabilité et une grande solidité. Voilà pourquoi on utilise souvent des alliages, c'est-à-dire une gamme de matériaux composée de couches collées. L'une des couches fournit la solidité (souvent en plastique) et l'autre l'imperméabilité (souvent une mince couche d'aluminium). Les produits sont emballés en sachets, soit sous vide (café moulu dans des sacs plastiques), soit sous un gaz inerte (N_2) comme les potages instantanés.

Tableau 3.7.3
Quelques matériaux
synthétiques
d'emballage et leurs
propriétés

Materiel d'emballage	Abbréviation	Caractéristiques	Propriétés
Chlorure de polyvinyl	PVC	sensible à la lumière et la chaleur; HCl peut être dégagé par incinération	barrière adéquate à l'humidité; stabilité chimique; résistance aux matières grasses; bon marché
Polyéthylène à basse densité	PEBD	utilisé depuis longtemps	souplesse; barrière à l'humidité et l'oxygène; bien soudable
Polyéthylène à haute densité	PEHD	structure linéaire forte	rigidité; moins transparent; bonne résistance à la chaleur
Polypropylène	PP	résistance à la chaleur (120-130°C)	durabilité; barrière à l'oxygène et l'humidité; soudable
Ethylène-vinyl-alcool	EVA	copolymère	barrière forte au gaz; lustré; très bien soudable; antistatique
Polyéthylène-téréphtalate	PET	poly-ester thermoplastique	très transparente; barrière à l'humidité et au gaz; résistance aux chocs et secousses
Polycarbonate	PC	produit de condensation des phénols bifonctionnels et un dérivé de CO ₂	très résistant aux chocs et secousses; barrière à l'humidité; résistant à la chaleur

3.7.5 Les matériaux d'emballage et l'environnement

Etant donné que les matériaux d'emballage jetés sont assez résistants, ils ne seront pas détruits par le temps comme les autres déchets. Cela implique que ces débris portent préjudice à l'environnement. D'ailleurs, dans les usines transformant les ordures domestiques en compost, les emballages difficilement dégradables posent des problèmes. Un autre aspect négatif de ces types d'emballages est qu'ils favorisent l'épuisement des ressources naturelles par l'usage unique de l'emballage. Afin d'essayer de résoudre ces problèmes, on centralise la collecte des ordures et l'on effectue le tri au centre de collecte. Tout le fer étamé est enlevé magnétiquement et on peut le réutiliser dans la production de fer étamé. L'aluminium est aussi enlevé et réutilisé. De la même façon, on peut collecter le verre, le moude et l'introduire dans les fours afin de le fondre.

La quantité d'emballage en plastique, soit collectée, soit jetée sur les abords des routes, augmente rapidement. Cependant, il n'est pas profitable de réutiliser les différents types de plastiques.

On a inventé récemment des plastiques qui sont détruits lentement par la lumière solaire ou qui peuvent être décomposés par les micro-organismes du sol (les plastiques biodégradables).

Applications	Perméabilité (cm ³ /m ² .jour/25μm épaisseur)			
	Oxygène (25°C, 50%HR)	Azote (25°C, 50%HR)	CO ₂ (25°C, 50%HR)	Vapeur d' H ₂ O 90%HR)
bouteilles, pots, moules thermoplastiques (coupes , etc.), rubans adhésifs	200	55	550	5
couches simples, couches contractibles, sacs industriels	7900	2800	42500	36
couches minces, petits sacs, bouteilles soufflées	2900	660	9100	22
couches transparentes, bouteilles, caisses, rubans	3800	760	12600	28
couches barrières dans les alliages, couche de soudure	2	-	-	30
bouteilles et pots à remplissage à chaud, étiquettes spéciales	110	13	320	22
bouteilles recyclables, bouteilles aux limonades gazeux, couches durables	4700	790	17000	170

ASPECTS DE CONSERVATION

4.1 Les aspects de cinétique

Avec la connaissance de la cinétique des réactions on peut déterminer la vitesse des changements dans les aliments et cela est important pour contrôler la qualité des aliments. Les changements peuvent être désirés mais parfois ils sont aussi indésirables. Le traitement le plus important est encore le traitement thermique et l'objectif principal est la destruction des micro-organismes. Les objectifs secondaires sont la cuisson, la destruction des enzymes, le développement de la réaction de Maillard, l'inactivation des facteurs antinutritionnels, etc. Mais on a aussi des réactions défavorables telles que la perte de la valeur nutritionnelle, le développement de goût et de couleur indésirables, c'est-à-dire la perte de la qualité. Une possibilité d'améliorer la qualité des aliments est l'optimisation des traitements thermiques. Les éléments nécessaires pour cela sont :

- la connaissance de la cinétique de pénétration de la chaleur dans le produit traité et la connaissance des propriétés thermiques des aliments (cf Chapitre 3)
- la connaissance de la cinétique de destruction des micro-organismes et des paramètres caractérisant leur thermorésistance et la connaissance des cinétiques des réactions secondaires (destruction des enzymes et des vitamines, brunissement, texture, etc.)

L'analyse de la cinétique qui suit est basée sur les réactions chimiques : qu'est-ce qui se passe entre les molécules ou les atomes pendant une réaction ? Généralement on peut représenter la vitesse v d'une réaction par :

$$v = -\frac{dc}{dt} = kc^n \quad (4.1)$$

avec c la concentration (mol l^{-1}), t le temps (s), k la constante de vitesse ($(\text{mol l}^{-1})^{1-n} \text{s}^{-1}$) et n l'ordre de la réaction (-). En principe, l'ordre n peut varier entre 0 et 3, mais fréquemment on utilise $n=0$, $n=1$ ou $n=2$. Dans le cas de $n=0$,

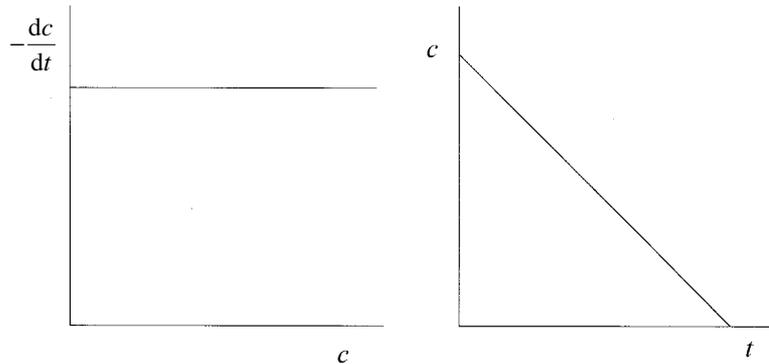
$$(4.2) \quad -\frac{dc}{dt} = k \cdot c^0 = k$$

et après intégration on trouve

$$(4.3) \quad c = c_0 - kt$$

Dans ce cas, la vitesse de la réaction est constante et indépendante de la concentration (Figure 4.1.1). Par exemple, on trouve un ordre $n=0$ pour la couleur due au brunissement non enzymatique (réaction de Maillard) dans les produits laitiers en poudre.

Figure 4.1.1
Une réaction
d'ordre $n=0$



Pour un ordre de $n = 1$

$$(4.4) \quad -\frac{dc}{dt} = kc$$

et après intégration

$$(4.5) \quad \ln c = \ln c_0 - kt$$

ou

$$(4.6) \quad c = c_0 \exp(-kt)$$

La figure 4.1.2 donne un exemple. La dénaturation des protéines/enzymes, et l'inactivation des micro-organismes est en général d'ordre $n = 1$.

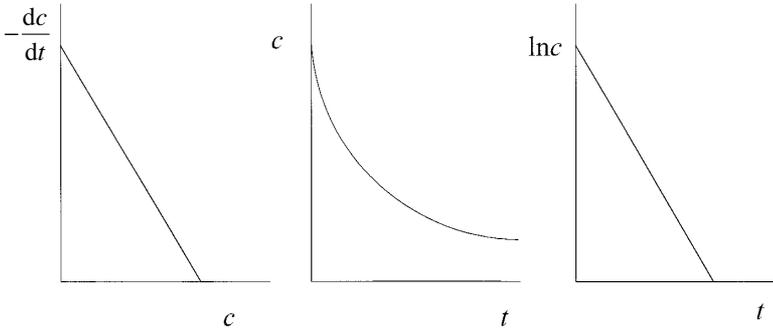


Figure 4.1.2
Une réaction
d'ordre $n=1$

Pour un ordre de $n = 2$, comme l'illustre la figure 4.1.3 :

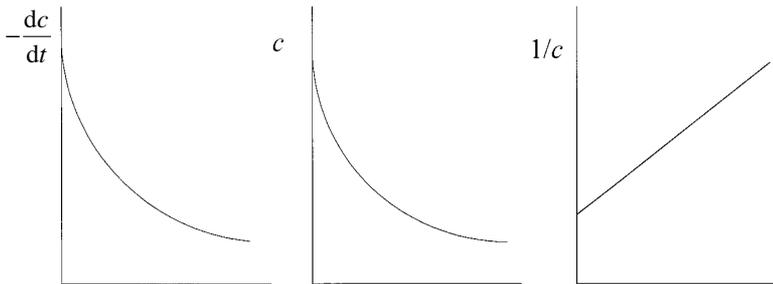


Figure 4.1.3
Une réaction
d'ordre $n=2$

$$-\frac{dc}{dt} = kc^2$$

(4.7)

et après intégration

$$c = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + kt}$$

(4.8)

ou

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} + kt$$

(4.9)

Un exemple est la réaction de Maillard initiale dans laquelle un sucre réducteur réagit avec une composante de groupe aminé.

Une fonction générale pour le changement de la concentration est :

$$c_t^{1-n} = c_0^{1-n} + (n-1)kt \quad \text{pour } n \neq 1$$

(4.10)

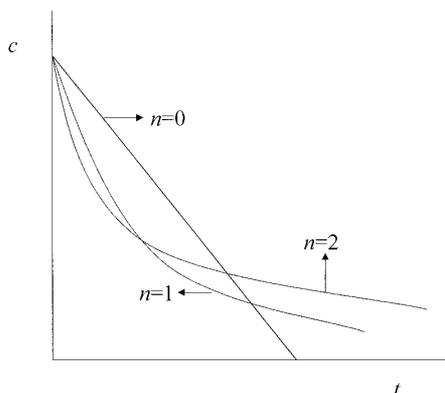
et

$$c_t = c_0 \exp(-kt) \quad \text{pour } n = 1$$

(4.11)

La figure 4.1.4. donne un résumé. Au fur et à mesure que l'ordre est élevé, la réaction initiale est plus rapide, tandis que la réaction terminale est plus lente.

Figure 4.1.4
Comparaison des
réactions d'ordre
 $n=0,1$ et 2



La constante de vitesse k est une fonction de la température, du pH, de a_w , etc. On utilise fréquemment la loi d'Arrhenius pour exprimer la dépendance par rapport à la température :

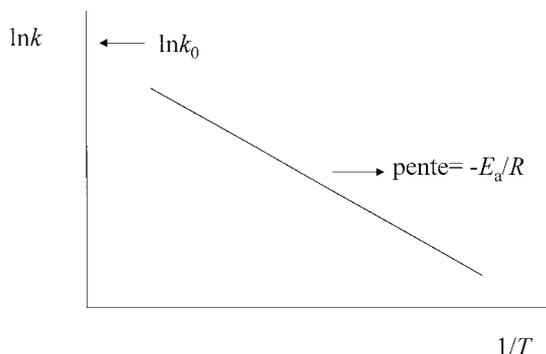
$$(4.12) \quad k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

ou

$$(4.13) \quad \ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT}$$

avec E_a l'énergie d'activation (J mol^{-1}), R la constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), k_0 le facteur pré-exponentiel (la même dimension que k), et T la température absolue. Si on prend le logarithme (comme dans l'équation 4.13) on obtient une ligne droite avec la pente $-E_a/R$ (Figure 4.1.5) (si la loi d'Arrhenius est applicable). On peut déterminer E_a et k_0 quand on détermine k à plusieurs températures.

Figure 4.1.5
Représentation de
la loi d'Arrhenius



Quand on connaît l'ordre de réaction n , E_a , et k_0 , on peut calculer l'effet du traitement à une certaine température. Par exemple, si $n = 0$, $E_a = 100 \text{ kJ/mol}$, $k_0 = 1 \times 10^9 \text{ mol/l/s}$, $c_0 = 1 \text{ mol/l}$:

$$c = c_0 - kt = c_0 - k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot t = 1 - 1 \times 10^9 \exp\left(-\frac{100000}{8,314 \times T}\right) \cdot t \quad (4.14) \quad (4.3)$$

et on peut calculer la concentration pour chaque combinaison de température T et de temps t .

C'est possible d'éliminer le facteur k_0 par comparaison de la loi d'Arrhenius à deux températures :

$$T_1 : k_1 = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_1}\right) \quad (4.15a)$$

$$T_2 : k_2 = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_2}\right) \quad (4.15b)$$

de sorte que

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp\left(-\frac{E_a}{RT_1} + \frac{E_a}{RT_2}\right) = \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right) \quad (4.16)$$

ou

$$\ln \frac{k_1}{k_2} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (4.17)$$

On peut élaborer cette équation pour trouver une relation entre le paramètre Q_{10} et E_a :

$$Q_{10} = \frac{k_{T+10}}{k_T} \quad (4.18)$$

$$E_a = \frac{R \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_2}{k_1} \quad (4.19)$$

Si $T_2 - T_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, par définition $Q_{10} = k_2/k_1$, et :

$$E_a = R \frac{T_1 T_2}{10} \ln Q_{10} \quad (4.20)$$

ou

$$Q_{10} = \exp\left(\frac{10E_a}{RT(T+10)}\right) \approx \exp\left(\frac{10E_a}{RT^2}\right) \quad (4.21)$$

Alors, on peut noter que le paramètre Q_{10} est une autre expression pour l'énergie d'activation, mais il faut qu'on réalise que le paramètre Q_{10} est fortement dépendant de la température (cf. équation 4.21).

Une autre conséquence de l'équation (4.17) est qu'on peut calculer les combinaisons de températures et de temps pour obtenir les traitements thermiques équivalents. Par exemple pour $n = 1$, l'équation (4.5) indique que $\ln(c_0/c) = kt$. Pour avoir un même effet le rapport c_0/c doit être constant, c'est-à-dire $k.t = \text{constant}$. Par exemple, pour $t_1.k_1 = t_2.k_2 = \ln(c_0/c)$ on trouve :

$$(4.22) \quad \frac{k_1}{k_2} = \frac{t_2}{t_1} = \exp\left(-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)$$

Si on connaît t_1 à T_1 pour obtenir un certain effet, on peut calculer le temps t_2 à la température T_2 pour avoir le même effet.

4.2 La conservation par la chaleur

4.2.1 Introduction

Deux types de phénomènes de dégradation des aliments peuvent être résolus par l'action des températures élevées : les réactions enzymatiques et l'action des micro-organismes défavorables comme illustrée au tableau 4.2.1. Le premier cas concerne surtout le blanchiment et le second la pasteurisation et la stérilisation.

Tableau 4.2.1
Opérations
thermiques

traitement	description
stérilisation	On traite le produit de manière telle que l'on ne peut plus rencontrer de micro-organismes ou de spores vivants.
pasteurisation	On chauffe le produit à une température inférieure à 100°C. Tous les micro-organismes peu résistants à la chaleur sont tués (au moins les germes pathogènes).
demi-conserve	L'aliment est partiellement conservé, par exemple par une combinaison de pasteurisation et du sel, d'acide, ou de produits de conservation. Les demi-conserves doivent être transportées et stockées à des températures inférieures à 10°C.
blanchiment	Un traitement thermique qui permet d'inactiver les enzymes.

De nombreuses enzymes présentes naturellement dans certains produits alimentaires catalysent des réactions entraînant des modifications défavorables de la qualité. Ces réactions commencent très tôt, dès la cueillette par exemple dans le cas des légumes verts. Le blanchiment est un traitement thermique préalable pour les aliments ensuite congelés, déshydratés ou pasteurisés. Ce traitement permet d'inactiver les enzymes en soumettant le produit à un bain d'eau chaude ou de vapeur pendant une durée courte (moins de cinq minutes) et à une température modérée (entre 60 et 100°C).

Le blanchiment offre parfois un autre intérêt, notamment celui d'améliorer la texture. Ainsi le blanchiment des tomates permet de préserver la couleur rouge et de ramollir les tissus, ce qui facilite les opérations ultérieures (obtention de sauce, de concentré ou de jus) en maintenant la couleur de la tomate fraîche.

Les haricots verts soumis à un blanchiment avant congélation gardent une belle couleur verte et sont rendus plus tendres. Pour les produits qui seront ensuite séchés, le blanchiment a aussi l'avantage d'augmenter la perméabilité des parois cellulaires du végétal et donc de faciliter à la fois le séchage et la réhydratation ultérieure. Enfin, l'opération de blanchiment favorise l'élimination de l'air et des autres gaz dans l'aliment et contribue ainsi à réduire les phénomènes d'oxydation, notamment dans les boîtes métalliques.

La pasteurisation vise une destruction sélective de la flore microbienne présente dans l'aliment. Elle s'effectue à des températures modérées (Tableau 4.2.2) et les micro-organismes sporulés ne sont en général pas détruits. De ce fait, on ne fait le choix d'une pasteurisation que dans certains cas; seulement quand l'aliment offre peu de risques bactériologiques du fait de ses caractéristiques propres (par exemple l'acidité dans les jus de fruits) ou bien si on ne cherche à éliminer que quelques organismes pathogènes (comme *Mycobacterium tuberculosis* dans le lait). Un traitement plus long ou à plus haute température risque de lui faire perdre ses qualités organoleptiques.

Produit	Durée	Température
Lait	30 min	62 °C
	15 sec	72 °C
Bière	1 - 2 min	87 - 88 °C
Jus de pomme en bouteille	30 min	77 °C
Jus de pomme en vrac	30 - 60 sec	88 °C

Tableau 4.2.2
Quelques barèmes
de pasteurisation

La stérilisation est plus sévère que la pasteurisation en permettant la destruction totale de tous les micro-organismes, y compris les sporulés. La stérilisation fait l'emploi d'une combinaison temps-température plus élevée que la pasteurisation. Une fois stérilisés et sous emballage hermétique, les aliments peuvent se conserver plusieurs mois, voire plusieurs années sans altération

s'ils sont exposés à l'abri d'une chaleur excessive. Les barèmes de stérilisation sont fonction des caractéristiques de l'aliment (composition, pH, charge microbienne initiale,...); ils peuvent varier entre 15 minutes à 121°C et quelques secondes à 140°C. Le principe est comme pour tout traitement thermique; plus la température est élevée, plus le temps est court pour arriver au même résultat (cf. l'équation 4.22).

Il y a encore quelques années, la stérilisation s'effectuait surtout à température modérée-temps long. Mais certains produits, en particulier le lait, perdaient beaucoup de leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques. Les recherches qui ont été effectuées à ce sujet ont montré que les réactions défavorables qui se produisent au cours du chauffage (pertes de vitamines, réaction de Maillard, etc.), n'ont pas la même sensibilité à la température que les micro-organismes. Dans le cas du lait par exemple, au-delà de 135 - 140°C, la perte de qualité est moindre que l'effet de destruction des micro-organismes pathogènes. On verra ce sujet d'optimisation des traitements thermiques plus en détail au paragraphe 4.2.3.

C'est Nicolas Appert qui en 1810 a mis au point un procédé de conservation de jus de fruits par chauffage dans des flacons hermétiquement clos. Puis en 1873, Pasteur a effectué des travaux sur le vin qui ont donné naissance à la microbiologie alimentaire. L'appertisation est un procédé de conservation qui consiste à enfermer un aliment dans un récipient hermétiquement fermé et à le soumettre à un chauffage. De cette façon la destruction des micro-organismes et des enzymes susceptibles d'altérer l'aliment est assurée.

L'étude des phénomènes physiques et microbiologiques a permis de mettre en évidence que la destruction des micro-organismes est directement proportionnelle au nombre de micro-organismes (cf. section 4.2.2). Autrement dit, plus la contamination est forte, plus le nombre de micro-organismes détruits par unité de temps est élevé. Plus la population de micro-organismes devient faible, plus la destruction des germes encore vivants est limitée et en théorie, on n'atteint jamais la stérilité absolue de l'aliment. En pratique, avec un traitement thermique prolongé, on arrive à réduire la charge ou le contenu microbien à un niveau tel que la probabilité d'avoir encore un germe vivant par boîte de conserve est extrêmement faible.

4.2.2 Cinétique de destruction des micro-organismes

Généralement on trouve une réaction d'ordre $n = 1$ approximativement pour la destruction des micro-organismes, c'est-à-dire :

$$(4.23) \quad N = N_0 \exp(-kt)$$

ou

$$\ln N = \ln N_0 - kt \quad (4.24)$$

ou

$$\log N = \log N_0 - \frac{k}{2,303} t \quad (4.25)$$

avec N le nombre de micro-organismes à l'instant t et N_0 le nombre initial (comparer les équations 4.5 et 4.6).

On peut définir maintenant la valeur D , le temps de réduction décimale, c'est-à-dire le temps nécessaire pour obtenir $N = 0,1 \times N_0$ (90% de cellules détruites), autrement dit pour obtenir $\log N_0 - \log N = 1$. On trouve alors que :

$$D = \frac{2,303}{k} \quad (4.26)$$

de manière que :

$$\log N = \log N_0 - \frac{t}{D} \quad (4.27)$$

ou

$$N = N_0 10^{-\frac{t}{D}} \quad (4.28)$$

La figure 4.2.1 représente l'équation (4.27).

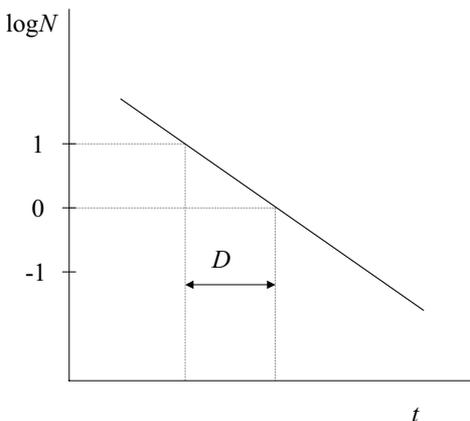
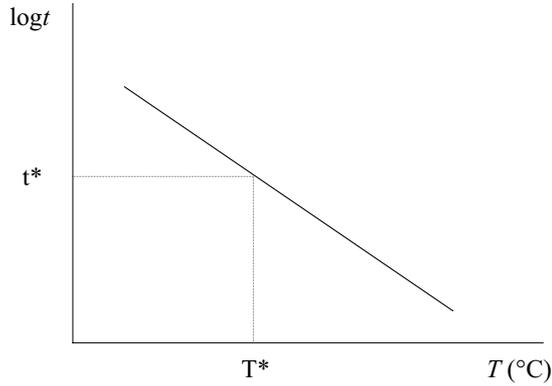


Figure 4.2.1
Diagramme de la
destruction de
micro-organismes
selon l'équation
(4.27)

L'effet de la température T sur la destruction des micro-organismes est décrit au paragraphe 4.1. Il existe une infinité de couples temps-température entraînant le même degré de destruction thermique. On peut utiliser deux modèles, l'équation d'Arrhenius (déjà

discutée, cf. équations 4.12 et 4.13) et le modèle de Bigelow (cf. Figure 4.2.2) :

Figure 4.2.2
Diagramme selon le modèle de Bigelow



(4.29) $\log t = aT + b$

Pour éliminer le coefficient b on prend un temps t^* et une température T^* de référence.

(4.30) $\log t = aT + b \rightarrow b = \log t - aT$

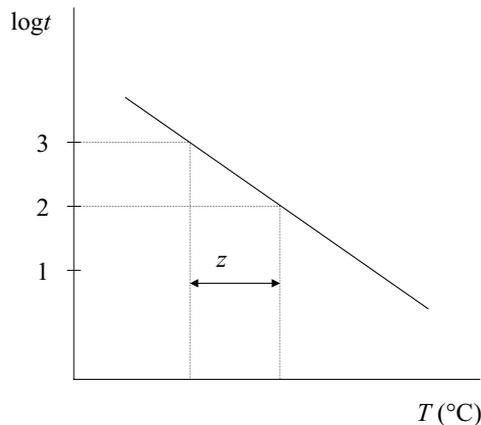
$\log t^* = aT^* + b \rightarrow \log t^* = aT^* + \log t - aT \rightarrow \log \frac{t^*}{t} = a(T^* - T)$

On introduit maintenant le coefficient z , qui représente l'élévation de température qui permet de réduire de 90% la durée de chauffage. Avec $a = -1/z$, on trouve à partir de l'équation 4.30 que :

(4.31) $\log \frac{t^*}{t} = -\frac{(T^* - T)}{z}$

La figure 4.2.3 donne une représentation de l'équation (4.31), une telle courbe est appelée courbe TDT (*thermal death time*).

Figure 4.2.3
Courbe TDT



On peut réorganiser l'équation (4.31) un peu pour arriver à :

$$\log \frac{t^*}{t} = -\frac{(T^* - T)}{z} \rightarrow \log t^* = \log t - \frac{T^* - T}{z} \rightarrow t^* = t \cdot 10^{\frac{T - T^*}{z}} \rightarrow$$

$$D^* = D \cdot 10^{\frac{T - T^*}{z}} \quad (4.32)$$

Traditionnellement on a choisi $T^* = 121,1^\circ\text{C}$ ($= 250^\circ\text{F}$) et on appelle $t^* = F$ la valeur stérilisatrice. Par conséquent :

$$\log \frac{F}{t} = \frac{T - 121,1}{z} \rightarrow F = t \cdot 10^{\frac{T - 121,1}{z}} \quad (4.33)$$

Comment peut-on choisir une valeur F ? L'équation (4.27) indique que :

$$\log \frac{N}{N_0} = -\frac{t}{D} \quad (4.34)$$

La réduction décimale n_D est définie comme :

$$n_D = -\frac{\log N}{\log N_0} \rightarrow \frac{t}{D} = n_D \rightarrow t = n_D \cdot D \quad (4.35)$$

Par définition, t à $121,1^\circ\text{C} = F$, alors $t = F = n_D \cdot D_{121,1}$. Par exemple, quand on a une valeur $N_0 = 10^3$ /boîte de spores de *C. botulinum* (pour lequel $D_{121} = 0,2$ minute), et quand on désire une valeur $n_D = 12$ (c'est-à-dire que $N = 10^{-9}$ /boîte), $F = n_D \cdot D_{121} = 12 \times 0,2 = 2,4$ minutes.

L'expérience de la préparation industrielle de conserves indique qu'une valeur $n_D = 12$ du nombre de spores de *C. botulinum* (la souche la plus thermorésistante qui ait jamais été isolée) est largement suffisante. Néanmoins, dans de nombreux cas, les valeurs F effectivement appliquées sont plus élevées car il faut tenir compte de micro-organismes plus résistants que *C. botulinum*.

Quelques exemples pourraient permettre de connaître l'importance des paramètres discutés. Si on a une réduction décimale $n_D = 10^{12}$ à $T = 105^\circ\text{C}$ et $t = 103$ minutes, et la même réduction à $T = 117^\circ\text{C}$ et $t = 6,5$ minutes, quelle est la valeur z ?

En utilisant l'équation 4.32 :

$$t^* = t \cdot 10^{\frac{T - T^*}{z}} \rightarrow z = \frac{T - T^*}{\log \frac{t^*}{t}} = \frac{105 - 117}{\log \frac{6,5}{103}} = \frac{-12}{-1,2} = 10^\circ\text{C}$$

On peut maintenant calculer quel temps est nécessaire à $T = 100^\circ\text{C}$ ou 120°C pour obtenir $n_D = 12$. Encore en utilisant l'équation 4.32 :

$$100^{\circ}\text{C} : t = t^* \cdot 10^{\frac{T^*-T}{z}} = 6,5 \times 50,12 = 326 \text{ minutes}$$

$$120^{\circ}\text{C} : t = 6,5 \times 0,5 = 3,26 \text{ minutes}$$

Avec ces données on peut aussi calculer la valeur D_{121} :

$$\text{à } 121^{\circ}\text{C} : t = 6,5 \times 0,39 = 2,53 \text{ minutes} = F = n_D \times D_{121} \rightarrow D_{121} = 0,21 \text{ minute}$$

Un autre exemple est le suivant. Il existe une population de 10^{12} spores, qui sont caractérisées par $D_{120} = 0,27$ minute et $z = 10^{\circ}\text{C}$. Combien de spores survivront après $t = 1$ h à 100°C et après $t = 20$ minutes à 120°C ?

$D_{120} = 0,27$ minute et $z = 10^{\circ}\text{C}$, c'est-à-dire par définition que $D_{110} = 2,7$ minutes, et $D_{100} = 27$ minutes.

$$\text{à } T = 100^{\circ}\text{C} : \frac{N}{N_0} = 10^{-\frac{t}{D}} \rightarrow N = 10^{12} \times 10^{-\frac{60}{27}} = 6 \times 10^9$$

$$\text{à } T = 120^{\circ}\text{C} : \frac{N}{N_0} = 10^{-\frac{t}{D}} \rightarrow N = 10^{12} \times 10^{-\frac{20}{0,27}} = 8,4 \times 10^{-63}$$

alors, cet exemple montre le très grand effet de la température sur le nombre de spores, et on peut conclure que le traitement à 100°C n'est pas suffisant. Avec ces données on peut faire d'autres calculs; par exemple quelle température est nécessaire pour avoir $n_D = 10$ en $t = 50$ minutes ?

$$t = n_D \times D \rightarrow 50 = 10 \times D \rightarrow D = 5 \text{ minutes}$$

$$D^* = D \cdot 10^{\frac{T-T^*}{z}} \rightarrow D^* = 0,27 \text{ minute}, T^* = 120^{\circ}\text{C} \rightarrow$$

$$0,27 = 5 \cdot 10^{\frac{T-120}{10}} \rightarrow T = 107^{\circ}\text{C}$$

En résumé :

D (ou k) et z (E_a) sont des paramètres caractéristiques de la thermorésistance de chaque espèce de micro-organisme (cf. Tableau 4.2.3 pour quelques valeurs); une valeur de z plus basse indique que la sensibilité du micro-organisme est plus élevée à une température élevée.

Tableau 4.2.3
Quelques valeurs de D et z à la température indiquée

Micro-organisme	Température	D (minutes)	z (°C)
E.coli	60	1,25	6
S. aureus	60	5	6
M. tuberculosis	60	15	7
Salmonella spp.	60	0,4-2,5	5-9
E. faecalis	60	15	7
C. botulinum	121	0,2	10
C. sporogenes	121	1,5	9
B. coagulans	121	0,05	10
B. stearothermophilus	121	5	10
Formes non-sporulées	121	$10^8 - 10^7$	5-7

F indique la durée du traitement nécessaire pour obtenir à $121,1^{\circ}\text{C}$ un niveau de réduction N/N_0 choisi.

La figure 4.2.4 montre en diagramme les effets de F et z .

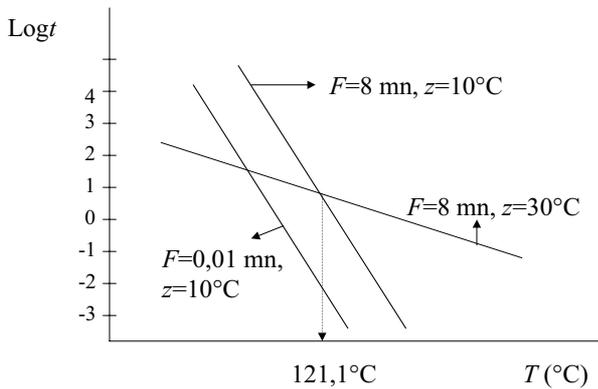


Figure 4.2.4
Diagrammes montrant l'effet des valeurs F et z .

On regroupe les micro-organismes à tuer selon leur thermorésistance " F ".

Groupe 1. Sensible : $F \leq$ (10 minutes à 80°C) mesuré en milieu faible en lipides).

La pasteurisation est fatale pour les champignons, les levures, les bactéries non-sporulées et les germes pathogènes. Dans le cas des conserves, si l'emballage est intact, ces micro-organismes ne causent pas de risques. Quand l'emballage n'est pas intègre, il y a une chance de réinfection par exemple causée par l'entrée de l'eau réfrigérante contaminée. Dans le cas des demi-conserves : il y a quelques non-sporulées (*Staphylococcus*), qui peuvent survivre à la pasteurisation. Pour le lait, le barème de pasteurisation est souvent 30 mn à 63°C , ce qui est équivalent à 15 s à 72°C . Ceux qui peuvent survivre sont : *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Corynebacterium* et *Lactobacillus*.

Groupe 2. Résistants : (10 minutes à 80°C) $< F \leq$ (10 minutes à 115°C , ou 4 minutes à 120°C), mesuré en milieu de pH 6-7, faible en lipides.

On a choisi cette limite de 4 min. 120°C pour pouvoir justement tuer les spores les plus résistants de *Clostridium botulinum* (cf. Chapitre 2.1). *Clostridium botulinum* forme la toxine "botuline" dans des milieux non-acides. Dans ce groupe, on trouve généralement les bactéries sporulées, comme *Bacillus* et *Clostridium*, groupées dans le tableau 4.2.4.

Groupe 3. Ultra Résistants : $F >$ (4 minutes à 120°C).

C'est le cas surtout des thermophiles ($50-55^{\circ}\text{C}$), qui peuvent causer des dégâts considérables dans les zones tropicales. De même que quelques non-thermophiles, par exemple *Cl. sporogènes* 3679

Tableau 4.2.4.
Bactéries sporogènes, Bacillus et Clostridium

Genre	Groupe	Exemple	Métabolisme des saccharides		Déliquescence de gélatine	F (min / 115°C)
			glucose	lactose		
Bacillus	aérobie	B. subtilis	a ¹	-	+	7
	anaérobie facultative	B. cereus	a	-	+	5
		B. polymyxa	a+g ²	a+g	+	5
Clostridium	en général protéolytique	Cl. sporogenes	a+g	-	+	4
		Cl. perfringens	a+g	a+g	+	10
		Cl. botulinum	a+g	-	+	10
	en général saccharolytique	Cl. pasteurianum	a+g	-	-	1
		Cl. butyricum	a+g	a+g	-	0,5

¹ a = acide; ² g = gaz

(cf. Tableau 4.2.5). Ces thermophiles posent des problèmes importants; on ne peut pas chauffer l'aliment jusqu'à la mort des plus résistants. Cela coûterait trop cher en plus de la déformation et de la décomposition du produit. Il faut prévenir la contamination par les micro-organismes de ce type ($F > 4$ mn 120°C) en appliquant des règles d'hygiène strictes. On peut appliquer HTST, combiné avec la mise en conserve stérile "aseptic canning".

Tableau 4.2.5.
Détérioration microbienne des conserves

Type de détérioration dans les conserves	Nom	Métabolisme des saccharides		Déliquescence de gélatine	F (min / 115°C)
		glucose	lactose		
"Flat sour " (aigreux sans bombage)	B. stearotherophilus	a ¹	-	+	45
"Putrid swell " (putréfaction avec bombage)	Cl. sporogenes 3679	a + g ²	-	+	15
"Sulfide spoilage " (putréfaction avec coloration noire)	Cl. nigrificans	-	-	-	10
"Hard swell " (bombage fort)	Cl. thermosaccharolyticum	a + g	a + g	-	5

¹ a = acide; ² g = gaz

On peut diviser les aliments en groupes selon leur pH :

1. Aliments acides à pH < 4,5. Ce sont surtout les fruits et les produits fermentés lactiques. La valeur F est petite, causée par le pH bas. Ces aliments sont assez faciles à conserver par voie thermique, parce que les spores non tuées ne sont pas capables de germer à ce pH. On applique pour ce groupe le traitement 1 (10 mn, 80°C), pasteurisation.

2. Aliments à faible acidité, et pauvre en lipides, avec un pH > 4,5 : ce sont par exemple les légumes (pH 5-6) et le lait (pH 6,7). F est plus grand qu'avec les aliments du type 1. Les spores peuvent germer parce que le pH est favorable; les ultrarésistants sont souvent absents; les produits de conservation ne sont pas autorisés. Dans ce cas, on vise à produire des aliments contenant le minimum (de préférence : zéro) de spores vivantes. On recommande le traitement 2, par exemple 10 mn à 115°C.

3. Aliments à faible acidité, et riche en lipides (15-45%), avec pH 5,5-6,5 : ce sont par exemple la viande et le poisson.

F est plus grand qu'avec les aliments du type 2, à cause du rôle protecteur des lipides contre l'effet thermique sur les cellules. Contrairement aux aliments de type 2, ici quelques produits de conservation sont autorisés (sel, nitrate, nitrite, substances de fumées). On recommande le traitement 2, par exemple 10 mn à 115°C.

4.2.3 Optimisation des traitements thermiques

En dehors de l'objectif principal (destruction des micro-organismes) il existe un certain nombre d'objectifs secondaires et de contraintes, tels que :

- La destruction des enzymes nuisibles (protéases, lipases, oxydases, etc.)
- La préservation de la qualité nutritionnelle (vitamines, protéines, etc.)
- La préservation de la qualité organoleptique (absence de brunissement, de faux goût, tenue des émulsions, absence de synérèse, etc.)

Les réactions secondaires ont leur propre cinétique mais par approximation les réactions peuvent être décrites par une cinétique de premier ordre (comme la destruction thermique des micro-organismes). On peut, par conséquent, aussi définir et déterminer les valeurs D et z pour les réactions secondaires. Le tableau 4.2.6 donne quelques exemples.

Le problème d'optimisation existe parce qu'on veut d'une part choisir une valeur F avec un certain seuil (par exemple, destruc-

Changement	z (°C)	$D_{121,1}$ (minutes)
Vitamine B1	25	140
Peroxydase	30	1,2
Catalase (épinards)	8,3	$2,3 \times 10^{-7}$
Chlorophylle A	51,1	12,8
Chlorophylle B	98,3	14,3
Anthocyanes (jus de raisin)	23	18
Brunissement (lait)	21	-
Formation de couleur (produit carné)	23	-
Texture de la viande bovine	35	-
Dépot de gelée (jambon)	16	-

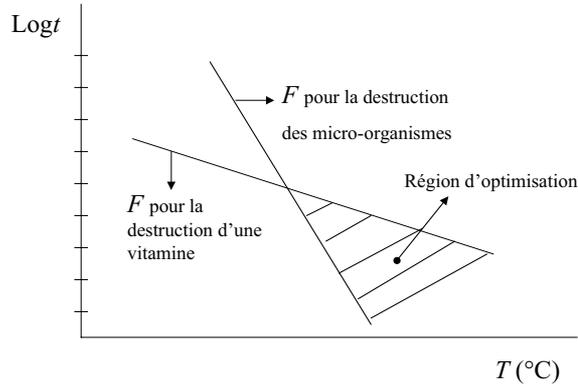
Tableau 4.2.6

Exemples de valeurs z et D à 121,1 °C pour quelques réactions secondaires

tion des enzymes ou des micro-organismes), et d'autre part une valeur F avec un certain plafond (par exemple, destruction des vitamines). La conséquence est qu'on est limité à choisir certaines combinaisons de températures et de temps (cf. Figure 4.2.5).

Quelques exemples peuvent éclairer sur l'utilisation de paramètres pour caractériser les réactions secondaires. Pendant la stérilisation du lait (4 sec à 135°C, traitement UHT) 99,6% de la vitamine B1 est préservée. La valeur z pour la destruction de la vitamine B1 étant de 25 °C (Tableau 4.2.6), quelle sera la proportion de vitamine B1 préservée si on stérilise à 110°C en maintenant la même valeur stérilisatrice ?

Figure 4.2.5
Diagramme représentant
le problème d'optimisation
de traitement
thermique



En utilisant l'équation 4.27 :

$$\frac{c}{c_0} = 0,996 = 10^{-\frac{t}{D_{135}}} \rightarrow D_{135} = 2298 \text{ s} = 38,3 \text{ minutes}$$

$$D^* = D \cdot 10^{\frac{T-T^*}{z}} \rightarrow 38,3 = D_{110} \cdot 10^{\frac{110-135}{25}} \rightarrow D_{110} = 383 \text{ minutes.}$$

L'équation pour la même valeur stérilisatrice est :

$$t^* = t \cdot 10^{\frac{T-T^*}{z}} \rightarrow 4 = t \cdot 10^{\frac{110-135}{10}} \rightarrow t = 1264,9 \text{ s} = 21,08 \text{ minutes}$$

$$\frac{c}{c_0} = 10^{-\frac{t}{D}} = 10^{-\frac{21,08}{383}} = 10^{-0,055} = 0,881$$

Le résultat est que 88,1% est préservée à 110°C et on peut noter que le traitement UHT est plus favorable.

Pour conclure la partie sur la cinétique voici un dernier exemple. Un traitement de 5 h à 74°C donne une destruction de 90% d'une protéase. La valeur z pour cette destruction est 32°C. Quel sera le taux de destruction en condition UHT (4 sec à 135°C) ?

Une destruction de 90% veut dire $c/c_0 = 0,1$, alors $D_{74} = 5 \text{ h} = 300 \text{ minutes}$:

$$D^* = D \cdot 10^{\frac{T-T^*}{z}} \rightarrow 300 = D_{135} \cdot 10^{\frac{135-74}{32}} \rightarrow D_{135} = 3,72 \text{ minutes}$$

$$\frac{c}{c_0} = 10^{-\frac{t}{D}} = 10^{-\frac{4}{223}} = 0,96$$

Le taux de destruction est seulement 4% par le traitement UHT par rapport à 90% à 74°C. Ces exemples montrent qu'on peut vraiment arriver à des résultats différents en variant les combinaisons de temps et de température.

4.2.4 Principes de l'exécution en pratique

L'idéal serait d'obtenir un aliment stérile. Cependant ce n'est pas toujours praticable. Pour stériliser, il faut chauffer aussi le centre de la boîte, pendant 10 min à 115°C par exemple. Cela prend souvent trop de temps (cf. Figure 4.2.6) et le produit sera sérieusement endommagé, en particulier les parties qui se trouvent à proximité de la paroi de la boîte. Au lieu de la stérilité absolue, on vise plutôt la "stérilité commerciale".

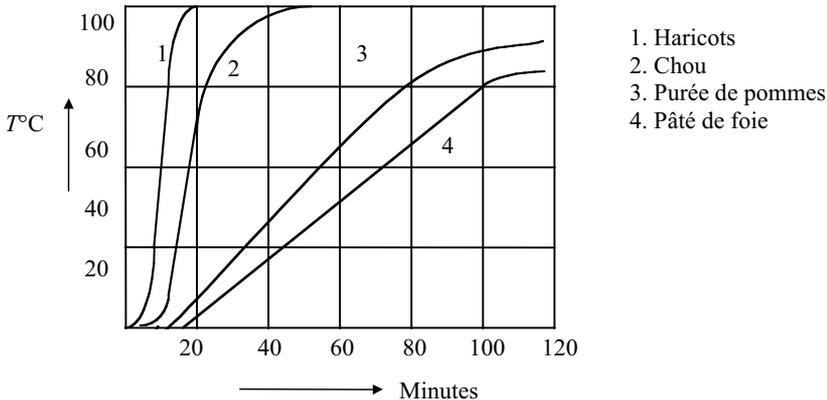


Figure 4.2.6

Transmission de chaleur dans quelques aliments en boîte (de 10 cm de diamètre), mesurée au centre de la boîte

4.2.4.1 Le processus minimal de destruction de *Clostridium botulinum*

La "stérilité commerciale" signifie qu'au moins toutes les spores de *Clostridium botulinum* + tous les germes pathogènes + les agents de détérioration ont été tués, et que les conditions de stockage ne permettent pas la croissance des micro-organismes. Pour cela, il faut atteindre au centre du produit, un équivalent de 4 mn à 120°C (y compris le temps de chauffage et de refroidissement).

4.2.4.2 Précautions générales pour la salubrité

Il faut garder le plus petit possible le nombre initial de micro-organismes, parce que cela réduit la chance d'avoir des ultras résistants; et la valeur F sera plus petite (fonction de N_0).

-Il faut être prudent avec l'addition de la gélatine, des condiments, du sucre, parce que ce sont souvent des sources de contamination microbienne.

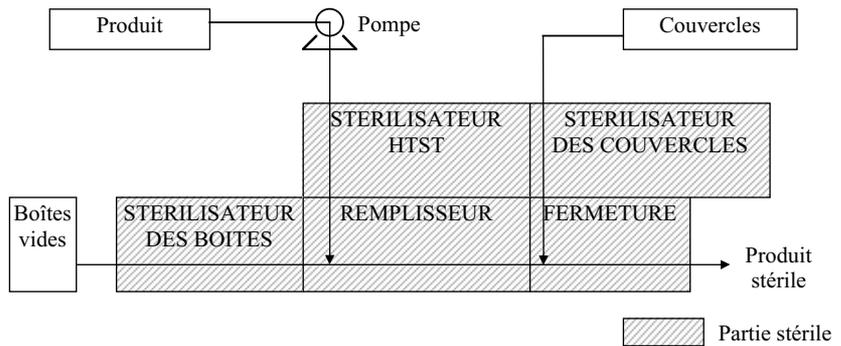
-Il faut accélérer la transmission de chaleur, parce que cela réduit la période de traitement thermique.

-Il faut refroidir le produit rapidement après le traitement thermique, surtout après "stérilisation commerciale". Comme les aliments peuvent contenir encore des spores qui peuvent survivre, il faut réduire les chances de leur germination. Pour cela, il faut refroidir dans l'eau froide courante (de l'eau potable ou désinfectée au chlore).

-HTST (High Temperature-Short Time) est le traitement à tempé-

rature élevée pendant une période de courte durée. L'intensité de la stérilisation (léthalité) augmente plus rapidement avec l'augmentation de la température que l'intensité de la décomposition chimique ; comme on l'a observé à la section 4.2.3. cela présente des avantages pour la conservation des nutriments. Un exemple pratique : 3 heures à 100°C causerait une caramélisation de 15 % alors qu'un traitement HTST équivalent à 1,8 mn à 120°C provoquerait une caramélisation de 1,35 %. Le traitement HTST est seulement praticable avec des produits liquides. Il est souvent combiné avec la mise en conserve stérile ou "aseptic canning". Le principe de la mise en conserve stérile est montré par la figure 4.2.7.

Figure 4.2.7
Mise en conserve stérile



4.2.5 Exécution pratique

Le transfert de chaleur de la paroi de la boîte de conserves au produit peut prendre place selon deux mécanismes : soit par conduction (matière solide), soit par convection (liquides). En fonction du mécanisme de transfert, les endroits les plus froids se trouvent dans le centre géométrique, ou un peu plus bas, comme montré par les figures 4.2.8 et 4.2.9.

4.2.5.1 Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est influencé par plusieurs paramètres :

- La viscosité du produit (conduction ou convection).
- La présence d'air dans la boîte (quand l'air est présent le contact entre la paroi et le produit est moindre).
- Le diamètre et la forme de la boîte.
- La présence de lipides (petit λ).
- Le ratio d'infusion à la quantité de produit solide (plus d'infusion améliore le transfert).
- Le type de milieu chauffant (vapeur ou eau).
- Le freinage du courant dans la boîte.
- Le freinage du courant autour de la boîte.
- La rotation de la boîte.

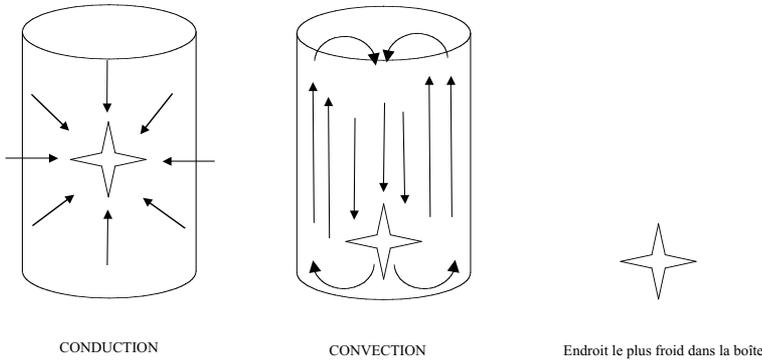


Figure 4.2.8
Types de transfert de chaleur en boîtes de conserve

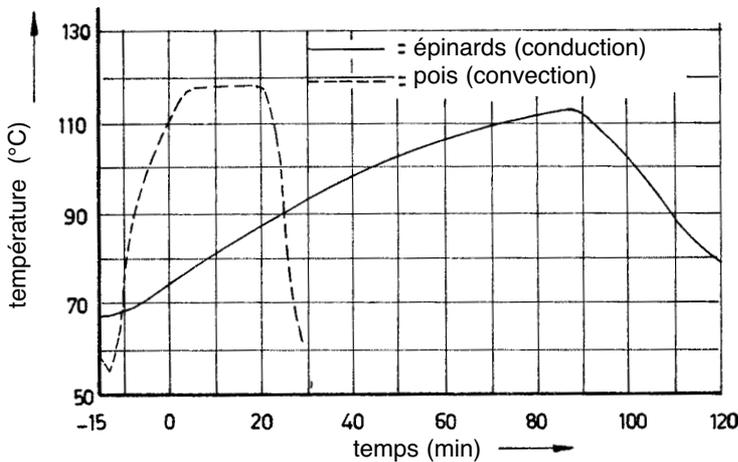


Figure 4.2.9
Températures à l'endroit le plus froid. Température auto-clave 118°C, boîtes de 1 litre

En fonction de la nature de l'aliment, on peut améliorer la transmission de chaleur par courant forcé (convection) dans la boîte en lui faisant subir une rotation.

Les paramètres suivants jouent des rôles importants :

- La largeur de l'espace de tête ou "headspace",
- La position de la boîte pendant la rotation,
- La vitesse de rotation.

4.2.5.2 Détermination de la combinaison de température-temps nécessaire

Comment établir le traitement adéquat? On connaît diverses options :

Méthode empirique par l'examen de la stérilité commerciale :

On transforme et emballe une partie entière du produit, en utilisant les types et dimensions d'emballages prévus pour la production commerciale. On divise la partie en lots de ± 100 unités. Chaque lot sera soumis à des combinaisons de temps et de température de chauffage différentes. Ensuite, on fait un essai de stockage à 37°C (favorise la croissance des mésophiles) et/ou 55°C

(favorise la croissance des thermophiles) pendant 14 jours, suivi par un examen microbiologique et sensoriel du produit. Enfin, on choisit une combinaison thermique résultant en un produit non affecté. Cette méthode présente deux inconvénients :

- le botulisme ne constitue plus un critère
- on a besoin d'une quantité considérable de matériels pour l'essai

Méthode par calcul : Cf. 4.2.2. et 4.2.3.

4.2.5.3 *Traitement à chaud des produits emballés*

Comme indiqué au chapitre 3.3, la vapeur d'eau est utilisée plus fréquemment comme milieu de chauffage. Pour atteindre des températures :

- jusqu'à 100°C : la vapeur à la pression atmosphérique suffit,
- plus de 100°C (jusqu'à ± 130°C) : il nous faut de la vapeur aux pressions élevées (Tableau 3.3.1) qu'on peut produire dans un autoclave par exemple.

Préalablement au traitement thermique, on prépare le produit par :

- le blanchiment (4.2.1),
- l' exhaustio (écarter l'air du produit rempli dans les boîtes de conserve) afin de :
 - * diminuer les processus d'oxydation,
 - * diminuer la corrosion de la boîte,
 - * obtenir un meilleur transfert de chaleur.

Dans cette section, on fera la distinction entre la production continue (flux permanent des produits en vrac ou emballés) ou discontinue (en charges). Ensuite, on distinguera selon l'agitation du produit, les appareils dans lesquels le produit reste stationnaire, et les appareils dans lesquels le produit est mélangé par rotation afin d'achever un meilleur transfert de chaleur.

Production discontinue - Produit stationnaire

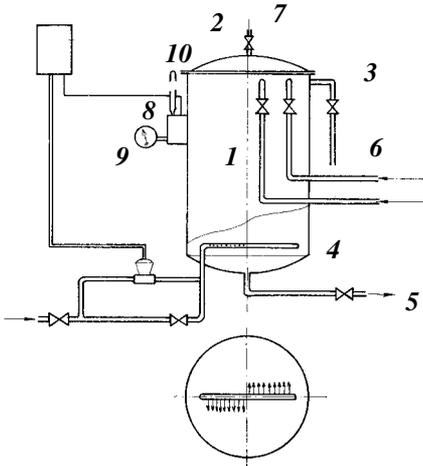
L'exemple le plus utilisé est l'autoclave simple (Figure 4.2.10).

Le procédé est comme suit :

- Remplir l'autoclave d'eau par la spirale 4 jusqu'au-dessus de celle-là.
- Les paniers chargés de boîtes sont placés dans l'autoclave.
- Fermer le couvercle 2.
- Ouvrir l'apport de vapeur entièrement avec le débordement 6 et l'échappement 7 ouverts.
- Après échappement de tout l'air, fermer le débordement entièrement et l'échappement partiellement.
- Quand on est arrivé à la température désirée, fermer le robinet de l'apport de vapeur partiellement et garder la température constante.
- Après la stérilisation, fermer tous les robinets (de même que l'échappement) et ouvrir entièrement l'apport d'eau.
- Quand la pression monte (manomètre), ouvrir le débordement

ment de manière à ce que la pression reste constante comme elle était pendant la stérilisation.

- Selon le type de boîte et le contenu, diminuer la pression après quelque temps, en fermant plus ou moins l'apport d'eau et/ou ouvrir le débordement. De cette manière, on règle le débit d'eau.
- Après le refroidissement (les boîtes sont à 30-40°C), diminuer la pression, ouvrir l'écoulement 5 et l'échappement 7.



1. Autoclave
2. Couvercle
3. Fermeture
4. Spirale pour l'eau et la vapeur
5. Ecoulement de l'eau
6. Débordement de l'eau
7. Echappement
8. Sûreté
9. Manomètre
10. Thermomètre

Figure 4.2.10
Autoclave

Alternative en cas d'absence d'eau courante :

- Après stérilisation, laisser échapper la pression lentement via 7.
- Enlever le panier avec les boîtes et le plonger dans un bac contenant de l'eau froide.

C'est une alternative moins avantageuse parce que le refroidissement est moins efficace, et on développe une grande surpression dans les boîtes (voir Figure 4.2.11) avec des risques de fissure.

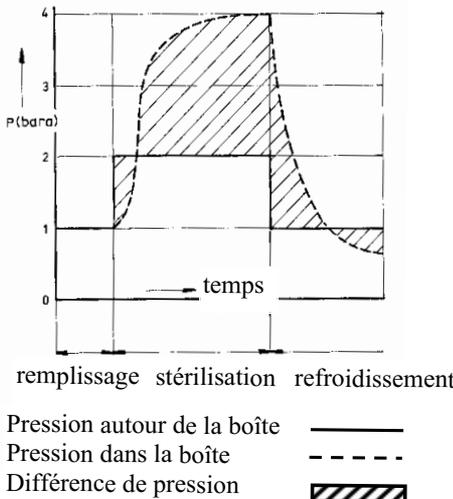
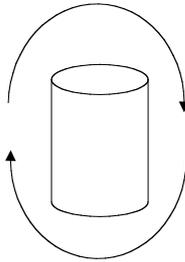


Figure 4.2.11

Cours de la pression dans une boîte pendant la stérilisation dans un autoclave. Température autoclave 118°C.

Figure 4.2.12
Stérilisation en boîte d'un produit liquide de façon rotatoire ("bout par dessus bout")



Production discontinue - Produit soumis à rotation

On utilise un autoclave avec une possibilité de rotation des boîtes.

Les boîtes sont bougées "end over end" (bout par-dessus bout), comme illustré sur la Figure 4.2.12.

Ce système plus coûteux est utilisé pour le traitement thermique des produits visqueux comme par exemple, le lait concentré dans lequel on vise à améliorer le transfert de chaleur, à éviter le surchauffage de l'extérieur du contenu, et à éviter la formation d'une peau.

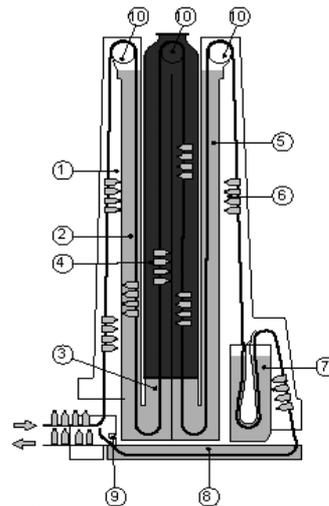
Production continue - Produit stationnaire

Les boîtes ou flacons remplis de produit sont transportés par la chaîne (Figure 3.2.3) à travers un tunnel rempli de vapeur thermostaté. A des températures supérieures à 100°C, on a des systèmes avec sas avec lesquels on traverse les différences de pression sans perdre la vapeur. Une autre possibilité est la stérilisation hydrostatique (Figure 4.2.13). Dans ce système, le réservoir d'eau sert comme "bouchon" qui évite l'échappement de la vapeur.

Production continue - Produit soumis à rotation

Il existe des systèmes qui combinent la continuité et les facilités de bouger les boîtes ou flacons.

Figure 4.2.13
Stérilisateur vertical hydrostatique continu à bouteilles.



1. Première étape de chauffage
2. Fermeture à eau et 2ème étape de chauffage
3. 3ème étape de chauffage
4. Section de stérilisation
5. Première étape de refroidissement
6. 2ème étape de refroidissement
7. 3ème étape de refroidissement
8. 4ème étape de refroidissement
9. étape finale de refroidissement
10. Essieux et rouleaux

■ vapeur

■ eau à refroidissement

4.2.5.4 Traitements thermiques des produits courants (non-emballés)

Ce sont le plus souvent les produits liquides, que l'on peut chauffer très précisément à HTST par procédé continu, suivi fréquemment par le remplissage dans des boîtes, flacons ou sachets sous des conditions stériles (Figure 4.2.7). Si la mise en conserve stérile n'est pas possible, on peut stabiliser le produit par une stérili-

sation complémentaire après la mise en boîte. Cependant, ce procédé est contre-indiqué pour la production, parce que le refroidissement du produit mis en boîte sera plus lent et ceci peut être à la base d'une perte de qualité.

On connaît 2 systèmes pour le traitement continu des liquides :

- *Les échangeurs de chaleur à tuyaux concentriques* (Figure 4.2.14). Ils sont utilisés pour le traitement des produits suffisamment liquides. Pour les produits visqueux on a inventé le "votator" (Figure 4.2.15) contenant des vis de transport qui évitent l'encroûtement.

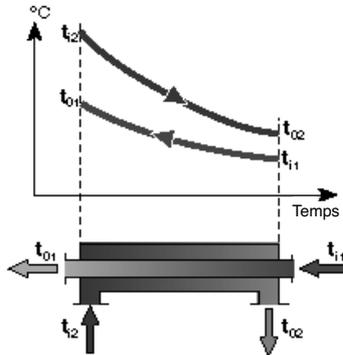


Figure 4.2.14

Profils de température et transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à courants opposés.

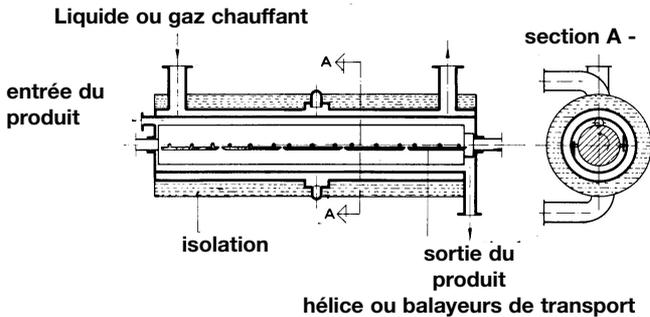


Figure 4.2.15

Votator

- *Les échangeurs de chaleur à plaques parallèles* (Figure 4.2.16). Ce sont les appareils les plus utilisés pour les liquides non visqueux (l'eau, le lait, la bière, etc.). Par une combinaison de distance entre les plaques (environ 5 mm), la vitesse (rapide) du courant du liquide (2-5 m/sec), et la surface rainée des plaques, on crée une turbulence forte, ce qui engendre un fort transfert de chaleur.

Les échangeurs de chaleur jouent un rôle important dans l'économie de la chaleur dans l'usine. Comme l'illustre la figure 4.2.17, on utilise un échangeur de chaleur afin de préchauffer le produit à chauffer, avec le produit chaud à refroidir. De cette façon, on économise l'énergie de chauffage et l'énergie de refroidissement.

Figure 4.2.16
Principe des courants
et transfert de chaleur
dans un échangeur à
plaques.

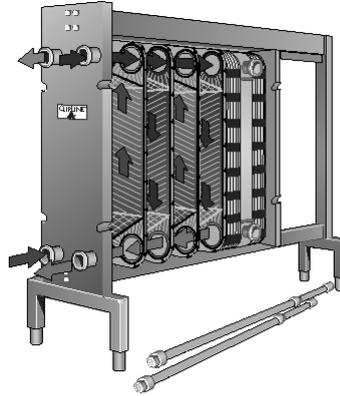
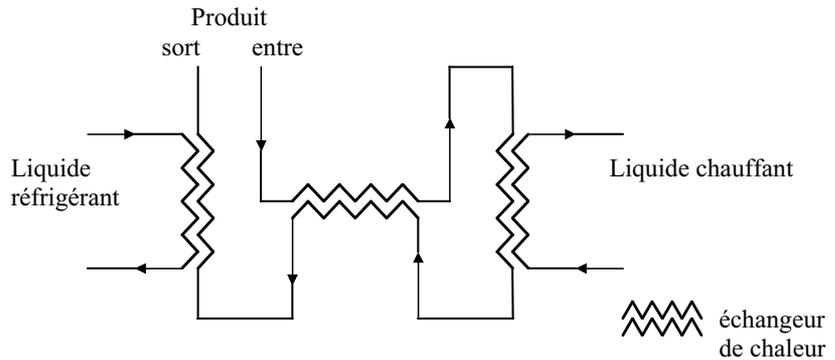


Figure 4.2.17
L'économie de la
chaleur



4.3 La conservation par le froid

4.3.1 Introduction

La méthode de conservation par le froid est devenue importante depuis l'invention et l'exploitation de la technique du froid (froid artificiel). On peut utiliser le froid comme moyen de conservation définitive mais aussi pour une conservation temporaire, par exemple pendant le transport. L'effet de conservation par le froid est causé surtout par le freinage du métabolisme des micro-organismes comme nous l'avons déjà vu au chapitre 2.1. Les micro-organismes ne sont pas tués. C'est pour cette raison que le froid doit être continu. Chaque interruption (augmentation de la température) réactive les micro-organismes.

Tandis que les micro-organismes psychrophiles survivent encore à -5°C , toute vie microbienne est arrêtée à des températures inférieures à -7°C .

Les autres processus de détérioration (réactions enzymatiques, chimiques, physico-chimiques) ne peuvent pas être arrêtés au-dessus de -30°C , mais en pratique, on applique la température de -20°C comme température finale.

4.3.2 Conditions

Quand on congèle les aliments (ou d'autres choses), il faut passer de la zone de 0°C à -5°C le plus rapidement possible, car dans cette zone a lieu la cristallisation de la glace (Figure 4.3.1). Pendant la réfrigération classique (courbe I), on obtient de gros cristaux de glace qui déchirent les cellules (Figure 4.3.2). Après la décongélation du produit, il y a une grande perte de substances solubles qui s'échappent avec le liquide des cellules. Avec la congélation rapide, on essaye d'éliminer ce problème (courbe II).

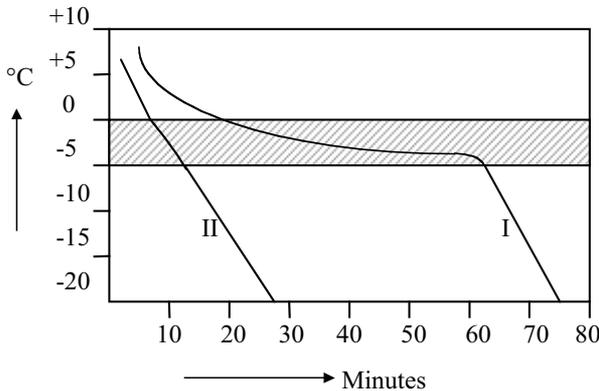


Figure 4.3.1

Cristallisation de la glace.
I Réfrigération lente : gros cristaux, déchirants.
II Réfrigération rapide : petits cristaux ronds, ne déchirent pas les cellules.

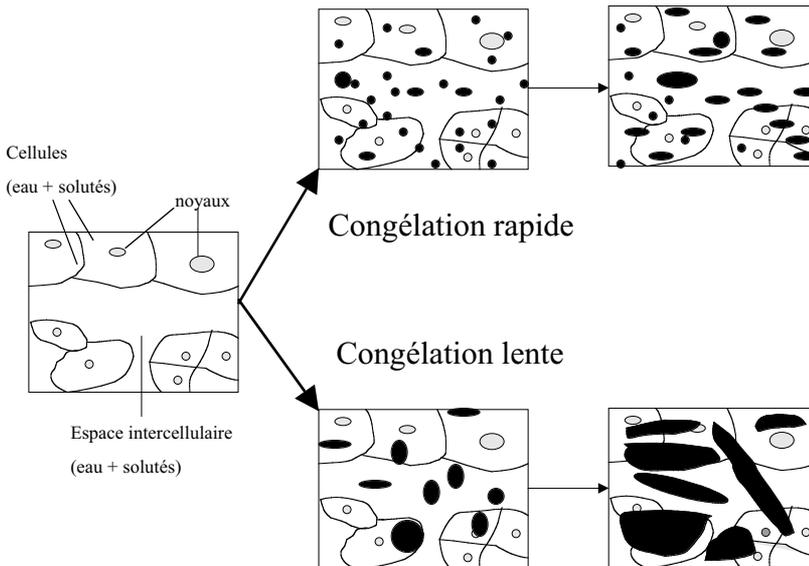


Figure 4.3.2

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

Les insectes et les parasites (de la viande : Trichines par exemple) sont facilement tués par une période de garde de 2-3 semaines à -20°C.

La réfrigération comme la congélation, est une technique de conservation qui nécessite une excellente qualité de la matière

première car elle ne permet qu'un ralentissement de la vitesse de détérioration. Il importe donc de ne réfrigérer que des aliments en bon état et frais. Il est par ailleurs indispensable de procéder à une réfrigération le plus tôt possible après une récolte ou abattage avant que le produit évolue ou se dégrade.

La température d'entreposage doit être choisie en fonction du produit et maintenue la plus constante possible jusqu'à sa distribution au niveau du consommateur. Il faut chercher le meilleur compromis entre la période de garde et les dépenses causées par l'application d'une température plus basse (Tableau 4.3.1).

Tableau 4.3.1
Relation entre durée de conservation et température de stockage.

Produit	Durée de conservation (jours)				
	10	30	90	180	360
Viande	4°C	-2°C	-7°C	-12°C	-18°C
Beurre	7°C	0°C	-7°C	-12°C	-18°C
Poisson	0°C	-9°C	-15°C	-20°C	-
Légumes congelés	-	-	-	-	-18°C

Le fait de stocker des aliments en général humides dans une atmosphère réfrigérée peut conduire à un rééquilibrage de l'activité de l'eau. Ce rééquilibrage peut être évité soit en emballant les aliments avec des matériaux hermétiques à l'eau, soit en maintenant l'air à une certaine humidité.

On essaiera de trouver un compromis entre deux facteurs, la diminution de l'humidité afin de freiner la croissance microbienne d'un côté et l'augmentation de l'humidité afin d'éviter la dessiccation des aliments de l'autre.

Le stockage de produits alimentaires différents dans un même entrepôt doit être évité car il conduit parfois à des imprégnations d'odeurs. Le melon, le beurre, le fromage frais par exemple captent très facilement des odeurs d'autres aliments stockés à leur voisinage immédiat. Comme nous l'avons déjà vu dans la chapitre 2, l'hygiène dans les entrepôts est très importante, aussi bien que la construction d'un aménagement intérieur : par exemple des étagères métalliques qui facilitent le nettoyage du magasin utilisé. Comme produit de désinfection, on utilisera une solution de formaldéhyde à 40% qui est pulvérisée par dose de 3 grammes de formaldéhyde par m³. On peut utiliser le formaldéhyde seulement quand le magasin n'est pas utilisé.

Il est parfois intéressant d'associer plusieurs techniques afin d'obtenir une conservation optimale des produits. Sur ce principe, les techniques d'atmosphère modifiée ou d'atmosphère contrôlée ont été développées pour les entrepôts de congélation. En jouant sur la composition de l'atmosphère ambiante (comme la teneur en azote, en oxygène et en gaz carbonique), en diminuant la proportion d'oxygène (O₂) de 21 % à 4 %, voire 1 %, on peut ralentir la plupart des réactions de maturation. En élevant la teneur en CO₂ jusqu'à 5 %, voire 10 %, on peut diminuer aussi l'intensité respi-

ratoire et il semble que certaines réactions enzymatiques sont inhibées. Dans le cas des oeufs, une atmosphère sans oxygène à 88 % de CO₂ et 12 % d'azote (N₂) permet une conservation de plus d'un an. Pour les viandes et les poissons, la conservation sous vide est efficace. On entrepose ainsi des carcasses en réfrigération pendant une à deux semaines alors qu'en atmosphère normale la durée maximale de conservation est d'un à deux jours.

4.3.3 Quelques applications de la réfrigération

La *viande* peut être conservée pendant 3-4 semaines, quand elle est réfrigérée jusqu'à 1°C en 24 heures et stockée à une activité de l'eau (a_w) de 0,85-0,90 et 0-1°C. Les organes doivent être congelés rapidement.

Les *poissons* et les *crustacés* se conservent moins facilement que la viande parce que, (a) le pH est de $\pm 6,5$ (viande 5,7) et facilite l'attaque des micro-organismes; (b) chez les poissons, la chair s'infecte plus facilement avec la saleté des intestins, et (c) à l'origine, les poissons ont plus de micro-organismes psychrophiles que la viande. La durée maximale de réfrigération est de 10 jours pour les poissons et de 3 jours pour les crustacés. Le poisson congelé rapidement, stocké à -30°C peut être conservé pendant 1-2 ans.

Le *lait* traité très hygiéniquement et réfrigéré rapidement à une température inférieure à 10°C et pasteurisé, peut être stocké à 0°C pendant 10 jours.

Le *beurre* de bonne qualité peut être stocké à 0-4°C pendant quelques semaines. Pour des périodes plus longues, il faut le congeler et le stocker à -10°C.

Les *oeufs* sont réfrigérés le plus rapidement possible à une température inférieure à 15°C; ensuite ils sont recouverts d'une mince couche d'huile afin de freiner l'évaporation et stockés à -1°C (a_w de 0,85) dans une atmosphère de 2,5 % de CO₂ et 97,5 % d'air.

Les *aliments séchés* ou *mis en conserves* sont stockés de préférence à des températures inférieures à 20°C afin de freiner les réactions chimiques telles que les réactions de Maillard et la caramélisation. Le Tableau 4.3.2 présente les conditions optimales de conservation des produits réfrigérés.

Les produits végétaux, en particulier, les fruits et les légumes sont en principe très sensibles au stockage à l'état frais. Après la récolte, les tissus végétaux continuent leur métabolisme. Quelques exemples de processus qui peuvent avoir lieu seuls ou de manière combinée sont :

- la décomposition des substances pectineuses : le collant entre les cellules disparaît et les fruits deviennent doux,
- la décomposition de l'amidon et la combustion des substances organiques. Le tissu a besoin d'oxygène et produit du CO₂. Du fait des changements de conditions par la combustion, il y a des quantités de produits de réaction qui peuvent différer des quantités normales. Par exemple, une accumulation de gluco-

Tableau 4.3.2
Conditions de conservation
des produits réfrigérés

<i>Produits non ou très peu sensibles au froid</i>				<i>Produits moyennement sensibles au froid</i>			
Fruits	°C	a_w	DPC	Fruits	°C	a_w	DPC
abricot	0	0,90	2-4 s	mandarine	4 - 6	0,85-0,95	4-6 s
citron (coloré)	0 - 4,5	0,85-0,90	2-6 m	mangoustan	4 - 5,5	0,85-0,95	6-7 s
datte (fraîche)	0	0,85	1-2 m	pastèque	5 - 10	0,85-0,95	2-3 s
fraise	0	0,90-0,95	1-5 j	<i>Légumes</i>			
kiwi	-0,5	0,90-0,95	8-14 s	Légumes	°C	a_w	DPC
noix de coco	0	0,80-0,90	1-2 m	haricot vert	7 - 8	0,85-0,90	2-4 s
orange (s.o.v.)	0 - 4	0,85 -0,90	3-4 m	pomme de terre	4 - 6	0,90-0,95	4-8 m
pêche	0	0,90	2-4 s	- (consommation)			
poire (s.o.v.)	0	0,90-0,95	2-5 m	- (industrie)	7 -10	0,90-0,95	2-5 m
pomme (s.o.v.)	0 - 4	0,90-0,95	2-4 s	<i>Produits très sensibles au froid</i>			
raisin (s.o.v.)	-1 - 0	0,90-0,95	1-4 m	Fruits	°C	a_w	DPC
<i>Légumes</i>				ananas (vert)	10 -13	0,85-0,90	2-4 s
Légumes	°C	a_w	DPC	ananas (mûr)	7 - 8	0,90	2-4 s
ail	0	0,65-0,70	6-7 m	avocat	7 -12	0,85-0,90	1-2 s
carottes	0	0,95	5-6 m	banane (verte)	12 -13	0,85-0,90	10-20 j
céleri	0	0,95	4-12 s	banane (colorée)	13 - 16	0,85-0,90	5-10 j
champignon	0	0,90-0,95	5-7 j	citron vert (s.o.v.)	10 - 14	0,85-0,90	1-4 m
chou (s.o.v.)	0	0,95	1-3 m	goyave	8 - 10	0,90	2-3 s
chou-fleur (s.o.v.)	0	0,95	2-3 s	lime	8,5 -10	0,85-0,90	3-6 s
laitue	0	0,95	1-2 s	mangue (s.o.v.)	7 - 12	0,90	3-7 s
maïs doux	0	0,95	1s	melon (s.o.v.)	7 - 10	0,85-0,90	1-12 s
navet	0	0,95	4-5 m	pamplemousse	10	0,85-0,90	2-3 m
oignon (sec)	0	0,65-0,70	6-8 m	papaye	7 - 10		1-3 s
radis	0	0,90-0,95	1-2 s	<i>Légumes</i>			
pomme de terre (semence)	2 - 3	0,90-0,95	5-8 m	Légumes	°C	a_w	DPC
<i>produits animaux</i>				aubergines	7 -10	0,90-0,95	10 j
produits animaux	°C	a_w	DPC	concombre (s.o.v.)	9 - 12	0,95	1-2 j
abats	-1,5 - 0	0,85-0,95	7 j	gingembre	13	0,65	6 m
agneau	-1,5 - 0	0,85-0,95	3-4 s	gombo	7,5 - 10	0,90-0,95	1-2 s
beurre	0 - 4		2-4 s	igname	16	0,85-0,90	3-5 s
boeuf	-1,5 - 0	0,85-0,95	3-5 s	patate douce	13 - 16	0,85-0,90	4-7 m
crème	-2 - 0		15 j	poivron doux	7 - 10	0,90-0,95	1-3 s
crustacés	0		4-6 j	potiron	10-13	0,50-0,75	2-5 m
fromage	5		1-2 s	tomate (verte)	12 - 13	0,85-0,90	1-2 s
fromage frais	0 - 2	0,85-0,90	2 m	tomate (mûre)	8 - 10	0,85-0,90	1 s
fromage à pâte molle	0 - 5	0,85-0,90	2 m				
fromage dur	-1 - 1	0,70-0,75	12 m	Abréviations:			
lait (cru)	0 - 4		2 j	a_w	activité de l'eau		
lait (pasteurisé)	4 - 6		7 j	DPC	Durée pratique de conservation		
oeufs (en coquille)	-1 - 0	0,90	6-7m	s.c.	suivant classe		
poisson (s.c.)	0		6-14 j	s.o.v.	selon origine et variété		
porc	-1,5 - 0	0,85-0,95	3 s	j	jour		
veau	-1,5 - 0	0,85-0,95	3s	s	semaine		
viande hachée	4	0,85-0,95	1 j	m	mois		
volailles éviscérées	-1 - 0	0,85-0,95					
- non éviscérées	0	0,60-0,70	3 s				
yaourt	2 - 5		2-3 s				

se peut avoir lieu comme résultat d'une décomposition accélérée de l'amidon (des pommes de terre qui deviennent sucrées après congélation).

On a malgré tout trouvé des conditions favorables pour le stockage au froid d'un grand nombre de fruits et légumes. Souvent, la solution se trouve dans le stockage à des températures moyennes (10-15°C) combiné avec un stockage au gaz. On maintient par exemple une concentration de CO₂ de 1% (air : 0,03 % de CO₂) pour le stockage de certains types de pommes.

Des concentrations de gaz trop élevées peuvent causer la décoloration de la chair des fruits (on utilise, par exemple, du CO₂, de l'éthylène CH₂=CH₂, de l'acétylène CH≡CH).

La congélation normale des fruits et légumes est peu appliquée, car après décongélation, les produits sont souvent en mauvais état. Au contraire la congélation rapide des produits végétaux a un bon avenir.

4.3.4 Aspects techniques du froid

4.3.4.1 Introduction

Quand on veut réfrigérer un produit A, il faut le mettre en contact avec un produit B ayant une température plus basse. Dans des zones modérées ou froides pour B, on peut utiliser des substances naturelles telles que la glace, l'air froid.

Dans la plupart des cas, on utilise du froid artificiel, c'est-à-dire produit dans une machine réfrigérante. On peut diviser les machines réfrigérantes (MR) en deux groupes selon leur principe d'action :

- MR à compresseurs (Figure 4.3.3), et
- MR à absorption (Figure 4.3.5).

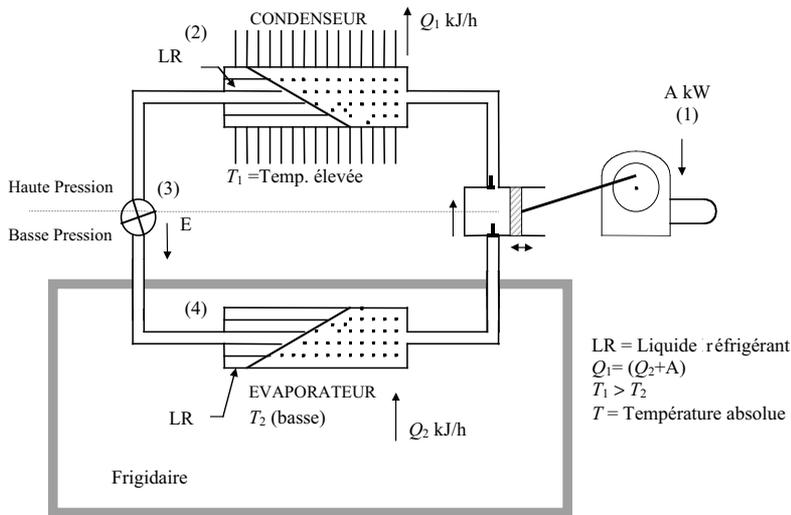


Figure 4.3.3
Système réfrigérant à compression

4.3.4.2 Machines réfrigérantes à compresseurs

Le cycle représenté sur la figure 4.3.3 est expliqué comme suit :

- Le liquide réfrigérant (LR) gazeux est comprimé adiabatiquement (pas d'échange de chaleur avec l'environnement) par addition d'une quantité de travail A kW, augmentation de la température ($T_2 \rightarrow T_1$).
- LR gazeux est condensé isothermiquement (T_1). Libération de chaleur de condensation (Q_2 kJ/h) + travail ajouté (A kW) = total Q_1 kJ/h.
- LR est détendu adiabatiquement dans une valve d'expansion; diminution de la température ($T_1 \rightarrow T_2$).
- LR est évaporé isothermiquement (T_2). Absorption de la chaleur d'évaporation (Q_2 kJ/h) par le système.

$$\text{L'effet utile de la MR } (\epsilon) = \frac{\text{chaleur absorbée } (Q_2)}{\text{travail effectué } (A)} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Avec cette formule, on peut démontrer que l'effet utile varie avec différentes températures de condensation et d'évaporation (Tableau 4.3.3).

Tableau 4.3.3
Effet utile ε d'une Machine
Réfrigérante (%)

Températures de l'évaporateur (°C)	Température du condenseur (°C)					
	10	15	20	25	30	35
-20	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5
-15	1,2	1,0	0,9	0,7	0,7	0,6
-10	1,5	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
-5	2,1	1,6	1,2	1,0	0,9	0,8
0	3,2	2,1	1,6	1,3	1,1	0,9

En pratique, la compression est effectuée dans un compresseur à piston (Figure 3.2.9); parfois on utilise des compresseurs rotatoires (Figures 3.2.10, 3.2.11, et 4.3.4).

Vers le condenseur

Vient de l'évaporateur

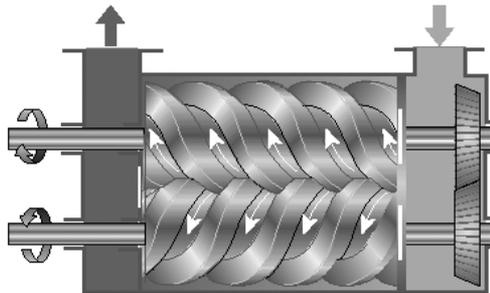


Figure 4.3.4
Principe d'un compresseur
à vis

La condensation est faite dans un condenseur pourvu d'un grand nombre de lamelles afin d'améliorer le transport de chaleur. La chaleur libérée dans le condenseur est transférée soit à l'air (courant libre ou forcé par des propulseurs), soit à l'eau. Le Tableau 4.3.4 montre les LR (Liquides Réfrigérants) utilisés dans les installations frigorifiques à compression.

Tableau 4.3.4
Liquides réfrigérants

Code	Formule chimique	Utilisation
R ₁₂	C.Cl ₂ .F ₂	réfrigérateurs et congélateurs de ménage; à présent on les remplace par R134A pour des raisons de protection de la couche d'ozone de l'atmosphère
R ₁₁	C.Cl ₃ .F	
R ₁₁₃	C ₂ .Cl ₃ .F ₃	
R ₂₂	CHClF ₂	climatiseurs
R _{134A}	C ₂ H ₂ F ₄	installations de ménage (frigo, congélateur, climatiseur)
R _{404A}	mélange de: R ₁₂₅ 44% R _{143A} 52% R _{134A} 4%	installations industrielles (capacité et ΔT élevées)

4.3.4.3 Machines Réfrigérantes à absorption

On applique ce système pour des grandes capacités quand on peut disposer de vapeur utilisée à bon marché. Dans ce système, on a remplacé le compresseur par un distillateur, un détendeur, un appareil à absorption et une pompe (Figure 4.3.5). On n'utilise pas un LR simple mais un mélange de NH_3 et d'eau. Il y a deux cycles. Le premier cycle (ABCD) est le cycle normal, qui produit le froid : NH_3 gazeux venant de B est condensé (libération de Q_1 kcal/h), après transfert de T_1 à T_2 et enfin évaporé (absorption de Q_2 kJ/h). Afin de pouvoir ajouter du travail au NH_3 gazeux, on absorbe le NH_3 dans l'eau chez A. La chaleur de la solution est transmise à l'eau réfrigérante. On transporte la solution concentrée en B par la pompe. En B, on évapore le NH_3 à l'aide de vapeur ou avec une autre source de chaleur; l'eau retourne en E via le détendeur.

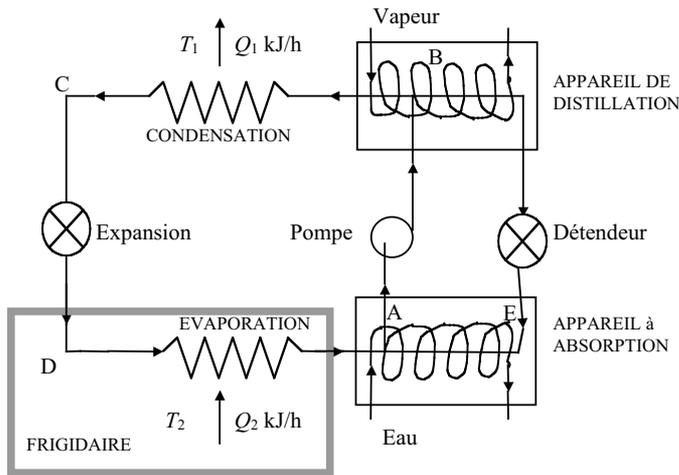


Figure 4.3.5
Système réfrigérant à absorption

4.3.5 Utilisation du froid

Pour des cas exceptionnels (où l'on utilise de l'eau, de la glace ou de l'air comme moyen réfrigérant), on peut mettre en contact le produit et le moyen réfrigérant. Dans la plupart des cas, il faut réfrigérer le produit par plusieurs étapes; on peut alors, par exemple, illustrer le cours du courant de chaleur comme suit :
PRODUIT → AIR → EVAPORATEUR METALLIQUE → MOYEN REFRIGERANT.

La méthode de réfrigération illustrée est la plus utilisée. On la rencontre dans les applications les plus connues du froid :

- entrepôts frigorifiques,
- congélation.

4.3.6 Entrepôts frigorifiques

4.3.6.1 Divers types d'entrepôts frigorifiques

En principe, on peut diviser les magasins en deux types :

- les magasins réfrigérés par l'air ambiant ; ils sont beaucoup

plus utilisés dans les zones modérées et froides,

- les magasins réfrigérés par l'air réfrigéré mécaniquement.
- Selon les températures employées, la composition de l'air, l'utilisation, on connaît par exemple : les cellules frigorifiques, les cellules de congélation, les réfrigérateurs, etc.

4.3.6.2 Quantité de chaleur nécessaire

La chaleur qu'il faut retirer du magasin frigorifique est produite par :

La production de chaleur par le produit, l'homme et les appareils :
La quantité de chaleur produite par les produits dépend de la température et du produit. Quelques exemples sont donnés dans le tableau 4.3.5.

Par exemple, quand la capacité de la machine réfrigérante ne suffit pas à retirer la chaleur produite par les bananes à 13°C, la température monte. À cause de cette augmentation, la production de chaleur augmente et à ce moment-là, il faut écarter une partie des bananes afin de pouvoir encore contrôler la situation.

La production de chaleur de l'homme est de l'ordre d'environ 1255 kJ.h⁻¹. Les appareils électriques produisent environ 3600 kJ.h⁻¹.kW⁻¹, soit 2645 kJ.h⁻¹.cv⁻¹.

Produit	Température (°C)	Développement de chaleur (kJ/Tonne/24 heures)		
Pomme de terre	0	700 - 1170		
	10	920 - 1840		
	Fraise	0	3350 - 3890	
		Pomme	0	755 - 1170
			5	1300 - 2050
15	5025 - 7955			
30	7535 - 17580			
Banane	13	3770		
	20	9210		
Oignon	0	670 - 1170		
Orange; citron	5	1255		

Tableau 4.3.5
Production de chaleur par les fruits et légumes

Apport de chaleur des espaces voisins à travers les parois isolées d'un magasin :

On calcule cette quantité de Joules à l'aide de la formule suivante :

$$Q = k_c * O * \Delta T \text{ avec :}$$

k_c = coefficient de passage total de chaleur (voir chap. 3.3.) = W m⁻² K⁻¹

O = superficie des parois en m²,

ΔT = différence de températures intérieures et extérieures, en °C.

Chaleur de refroidissement et de congélation des produits :

On calcule la chaleur de refroidissement à l'aide de la formule suivante :

$Q = c_p * m * \Delta T$ avec :

c_p = chaleur spécifique du produit, en $J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,

m = poids du produit, en kg,

ΔT = différence des températures avant et après refroidissement, en °C.

La chaleur de congélation :

$Q = d_{ch} * m$ avec :

d_{ch} = chaleur de congélation, en $J \text{ kg}^{-1}$,

m = poids, en kg.

Quelques exemples de chaleurs spécifiques et de congélation sont présentés au tableau 4.3.6.

Produit	Chaleur spécifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)		Chaleur de congélation ($J.kg^{-1}$)
	pas congelé	congelé	
Beurre	2512	1423	196742
Oeufs	3181	1674	226044
Fruits	3851	2093	280462
Lait	3893	2051	293020
Poisson frais	3433	1800	242788
Viande	2930	1674	209300

Tableau 4.3.6

Chaleur spécifique et chaleur de congélation de quelques aliments.

Exemple d'un calcul de capacité :

Un magasin frigorifique à viande ($10 * 10 * 3$ m) est chargé de 35000 kg de viande par semaine. Pour ce travail, la main-d'oeuvre nécessaire est de trois personnes travaillant chacune 5 heures par jour. Pendant la période de travail, 3 ampoules de 100 Watts sont allumées. Le moteur du ventilateur de la machine réfrigérante nécessite une puissance de 500 Watts. La température de l'air extérieur est de 35°C et la température intérieure de 5°C. Le coefficient de passage total : $k_c = 0,41 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. La quantité de chaleur qui est produite en 24 heures et qui doit être retirée est calculée au tableau 4.3.7.

Sources d'énergie	kJ/24 heures
Produit (développement de chaleur)	0
Personnes: $3 * 5 * 1255 =$	18825
Éclairage: $3 * 5 * 100 * 3,5993 =$	5399
Ventilateur: $1 * 24 * 500 * 3,5993 =$	43192
Espaces voisins: $0,41 * 3,5993 * 2 * (10 * 10 + 2 * 10 * 3) * 30 * 24 =$	3400004
Réfrigération du produit: $(35000 : 7) * 2,930 * 30 =$	439500
	Total :
	3.906.920 kJ/24 heures

Tableau 4.3.7

Calcul de capacité d'un magasin frigorifique

Quand la machine réfrigérante fonctionne 16 heures par jour, il faut au moins une capacité de $(3.906.920 : 16) = 244.182 \text{ kJ.h}^{-1}$ (soit 67842 W ou 67,8 kW).

4.3.6.3 Tempérer

Avant que les produits sortent du magasin frigorifique, il faut prendre des mesures afin d'éviter une condensation sur le produit. Dans la pratique, les produits sont emballés dans une matière d'emballage imperméable avant qu'on les fasse sortir du magasin.

4.3.6.4 Matériaux d'isolation

L'air est un très mauvais conducteur de chaleur, à condition que l'air ne circule pas. Dans beaucoup de matériaux d'isolation, on profite de cette propriété en incorporant beaucoup d'air dans des petites cellules et ce afin d'éviter les courants d'air.

Il y a de nombreux types et marques de matériaux d'isolation. En général, on peut classer les matériaux d'isolation selon leurs origines:

Origine naturelle :

liège,
caoutchouc,
bois,
paille,

Origine synthétique :

tempex
polyvinylchloride (PVC) ou chlorure de polyvinyle,
polystyrène, etc.

4.3.6.5 Construction des magasins frigorifiques

Magasins frigorifiques : température $> 0^{\circ}\text{C}$.

Magasins de congélation : température $< 0^{\circ}\text{C}$.

On peut classer les divers types de cellules frigorifiques selon leurs fonctions :

- cellules à pré-réfrigération, où l'on baisse rapidement la température des produits jusqu'à la température désirée de stockage.
- cellules frigorifiques normales, où l'on garde les produits pendant une plus longue période. Ici, il faut avoir la possibilité de contrôler le taux d'humidité de l'air. D'ailleurs, il faut assurer une bonne circulation de l'air à travers les produits.
- cellules à gaz, où l'on garde les produits dans une atmosphère de composition différente de celle de l'air. Afin de garder la composition de l'atmosphère constante, il faut une construction imperméable au gaz.
- cellules à tempérer, où l'on chauffe le produit sous des conditions très sèches, afin d'éviter une condensation sur le produit quand il sort du magasin frigorifique.

Les cellules de congélation sont en principe construites de la même façon que les cellules frigorifiques, sauf si on exige plus de la capacité de la machine réfrigérante et des parois isolées. On distingue :

- les tunnels à congélation, qui ont la même fonction que les

cellules à pré-réfrigération, c'est-à-dire qu'ils servent à congeler rapidement les produits avant qu'ils soient stockés dans les cellules à congélation.

- les cellules à congélation qui servent à stocker les produits plus longtemps. Les produits sont presque toujours emballés et ne nécessitent guère un contrôle régulier; pendant le stockage, on peut empiler les produits.
- les cellules coopératives à congélation, surtout très utiles à la campagne, où les paysans peuvent louer une ou plusieurs boîtes qui se trouvent dans une grande cellule à congélation.

4.3.6.6 *La chaîne froide*

La conservation par le froid implique le transport et la distribution à un froid continu.

Dans l'usine, il est important de transporter les produits entre les cellules sans les décongeler. Ceci peut avoir lieu à des températures inférieures à 0°C (par exemple, produits sucrés ou salés). De l'usine au détaillant, on utilise, par exemple, des navires possédant des cales réfrigérées, des camions et wagons réfrigérés.

Pour la distribution, les détaillants utilisent des chambres froides pour le stockage et dans le magasin, les boîtes réfrigérées "reach-in". Le consommateur utilise les réfrigérateurs et les congélateurs de ménage.

4.4 La conservation à sec

4.4.1 Introduction

Sécher est une des méthodes les plus anciennes de conservation. Le but du séchage a toujours été d'obtenir un produit léger et stable, qu'on peut facilement emballer et garder. La technique classique consiste à sécher le produit à l'aide de l'air ambiant préalablement séché par la radiation solaire. Dans certaines régions du monde, par exemple au Mali et au Burkina-Faso, cette méthode est très utilisée. Cependant, la plus grande partie de la production des aliments séchés est effectuée par des méthodes artificielles.

Dans les méthodes de conservation, on peut comparer le séchage avec l'utilisation du froid; les micro-organismes ne sont pas tués, seulement les conditions sont modifiées.

Souvent, on améliore la conservation des produits séchés par le fumage ou l'emballage sous un gaz inerte. Ce sont toujours les propriétés caractéristiques de l'aliment qui doivent déterminer les conditions de séchage. L'exécution technique est de moindre importance et est dictée par les conditions désirées. En principe, les conditions les plus favorables sont une température basse du produit et des périodes courtes de séchage. De cette manière, les changements chimiques sont freinés le plus fortement possible. En pratique, on ne peut pas appliquer toujours et partout ces condi-

tions idéales, parce qu'elles posent des problèmes d'ordre financier.

Une température basse peut s'obtenir par l'application du vide (mais c'est cher). Il est beaucoup plus important de garder les produits séchés à des températures peu élevées, parce que pendant les (souvent longues) périodes de garde, il y a un certain nombre de changements qui sont fortement accélérés par une augmentation de la température.

De nombreux facteurs interviennent au cours du séchage, déterminant sa rapidité et la qualité du produit obtenu :

- la température de l'air;
- le débit de l'air permettant l'évacuation de la vapeur d'eau formée;
- les caractéristiques du produit (composition, texture,...);
- les dimensions du produit (épaisseur, etc.).

En général, la perte en eau est rapide au début puis se ralentit et si l'opération se prolonge, il n'y a plus d'eau dans l'aliment et donc plus de déshydratation.

Le type de séchage le plus courant utilise l'air chaud obtenu soit grâce au soleil (séchage solaire), soit par d'autres moyens (combustion de bois, de gaz, de gas-oil,...). Par le réchauffage naturel ou artificiel de l'air, on amène celui-ci à une humidité relative faible, ce qui lui permet de "capter" l'eau des aliments mis à sécher. Ce chauffage de l'air permet aussi d'élever la température de l'aliment et de faciliter ainsi l'évaporation de son eau. Pour que le séchage à l'air ne soit pas trop long, il faut que l'aliment soit disposé en couches minces et que l'air puisse circuler autour d'elles.

Différents types de séchoirs existent. Tous les séchoirs solaires se basent sur le même principe, depuis le plus rudimentaire (un sol en terre battue, un morceau de toile ou une terrasse en ciment où sont étalés les produits, par exemple

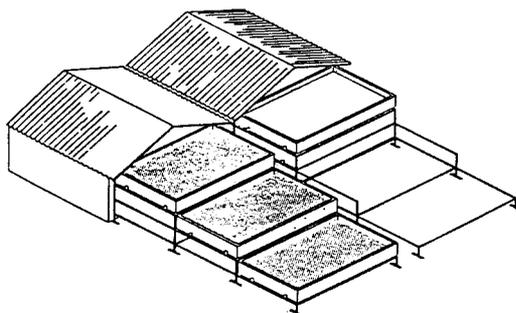


Figure 4.4.1
Séchoir type "autobus" pour
café, maïs, cacao etc.

graines de céréales ou légumineuses, graines de café, fèves de cacao...) jusqu'au plus élaboré avec capteurs solaires et circulation d'air forcée, en passant par les claies séchoirs "autobus" avec des claies mobiles et un toit qui permet de protéger les produits en cas de pluie. (cf. figure 4.4.1)

En termes quantitatifs, ce sont les céréales et autres grains et graines (légumineuses, café, cacao...) qui sont les plus concernés car leur conservation et leur stockage ne sont possibles qu'après séchage. Partout et depuis des millénaires, les paysans ont mis au

point des techniques de séchage adaptées aux produits, aux moyens, aux conditions climatiques. Malgré cela, le séchage reste une étape critique dans le processus post-récolte qui occasionne de nombreuses pertes, en particulier quand les populations ne disposent pas de moyens de séchage artificiel et que les conditions climatiques ne sont pas favorables.

A maturité, les divers grains et graines ont un taux d'humidité élevé, 30 à 40 %. Après la récolte, les grains, organes végétaux, continuent à respirer et plus ils sont humides plus la respiration est intense et le dégagement de chaleur important. En stockant un grain humide, la température augmente rapidement, des moisissures et des fermentations se développent et les grains se prennent en masse. Les insectes, eux, peuvent se développer sur des grains d'humidité inférieure à 10-11 %. La germination n'a lieu qu'au-delà d'une certaine teneur en eau du grain (18-25 %). Tous ces phénomènes sont favorisés par des températures relativement élevées (20 à 35°C) et les conditions de la plupart des pays en développement leur sont donc propices.

De ce fait, la durée de conservation d'un grain est fonction de la température ambiante et de l'humidité du grain. Ainsi à la température de 25°C, le grain de maïs peut être stocké à 22 % d'humidité pendant 7 jours au plus ou à 12 % d'humidité pendant plusieurs mois. La teneur en eau du grain se maintient en équilibre

grains	humidité maximum pour stockage (sauvegarde)	type de séchage traditionnel
riz	14 %	Séchage des panicules avant battage à l'ombre car le sur-chauffage entraîne le clivage des grains au décorticage.
maïs	13 %	Séchage des épis sur pied, en vrac ou en grenier, en crib, etc. Séchage des grains sur bâches, en tas. Risques importantes de pertes à cause de la lenteur de séchage.
mil et sorgho	13 - 15 %	Séchage des épis en bottes ou en meules au soleil, en claies ou sur des aires de séchage. Pas de difficultés particulières, pertes souvent faibles.
légumineuses:		Séchage difficile. D'abord séchage des gousses au champ sur pied ou après arrachage puis séchage des graines après battage en claies ou sur aires de séchage. Risques de développement de toxines si le séchage est trop lent ou insuffisant.
haricots	14 %	
soja	11 %	
arachide	7 - 8 %	
cacao	7 - 7,5 %	Risques importants de moisissures et insectes (mites) car culture en zone humide. Séchage naturel des fèves sur nattes, au sol ou sur tréteaux. Séchoir autobus dans grandes exploitations.
café, robusta	8 %	Séchage solaire sur claies ou sol en terre battue ou aires de ciment.
café, arabica	10 %	Nécessité de séchage artificiel quand la récolte est en saison des pluies, il risque une perte de goût.

Tableau 4.4.1
Stockage et séchage des grains

avec l'humidité relative de l'air dans laquelle il est stocké. Si l'air est humide, le grain se réhumidifie. A l'inverse, dans une atmosphère très sèche, le grain peut perdre un peu d'eau au cours du stockage. Quelques chiffres de référence sont donnés dans le tableau 4.4.1 pour les conditions tropicales.

D'autres produits agricoles bruts ou transformés sont couramment séchés pour leur conservation. C'est le cas par exemple du manioc : le gari, la farinha, l'amidon aigre, les cossettes, le tapioca, produits issus du manioc après diverses transformations, sont séchés soit au soleil, soit à la chaleur sèche dans une marmite, soit avec des équipements industriels. Dans de nombreuses zones de pêche, le poisson est mis à sécher après un salage ou une fermentation.

On peut généralement classer les produits à sécher en plusieurs groupes :

- les substances simples, souvent des matières purifiées telles que des saccharides, de l'amidon, etc. En principe, les techniques de séchage nécessaires sont les plus simples.
- les substances liquides (solutions, suspensions, émulsions, etc.), qui sont souvent séchées par pulvérisation ou par des plaques chauffées.
- la plupart des aliments qui ont gardé leurs propres structures, tels que la viande, le poisson, les légumes blanchis, le café, les fruits, etc. La période de séchage du dernier groupe d'aliments est très longue étant donné l'hétérogénéité du produit et les phénomènes de migration d'humidité du centre du produit vers l'extérieur.

4.4.2 Aspects microbiologiques

Comme nous l'avons déjà vu au chapitre 1.2, l'activité de l'eau (a_w) est un facteur qui influence fortement la croissance microbienne. On a trouvé que les valeurs de a_w inférieures à 0,70 évitent généralement la détérioration microbienne. Cela ne veut pas dire que l'on n'a pas de problèmes microbiologiques dans les séchoirs. En respectant des règles précises d'hygiène, on évite la présence des microbes pathogènes dans les produits séchés. Avec des manipulations techniques adéquates, on évite la prolifération des micro-organismes pendant les premières phases du séchage.

4.4.3 Quelques points hygiéniques indispensables

L'assurance de salubrité, par exemple le système HACCP (cf. 5.5.3) ne peut être effectif que si les mesures de base suivantes sont prises:

- Éviter l'infection des aliments séchés par contact avec les parois et les sols.
- Nettoyer fréquemment et efficacement (contrôle !) les appareils, les instruments, etc.
- Distribuer au personnel des vêtements de travail et des cha-

peaux propres que l'on peut changer et stériliser fréquemment.

- Construire, entretenir et contrôler un nombre suffisant de toilettes (w.c.), pourvues de brosses, de l'eau courante chaude et froide, de savon et de serviettes de façon à se sécher les mains efficacement et hygiéniquement.
- Contrôler régulièrement le personnel : état de santé général, état de la peau, des cheveux et des ongles.
- Se défendre contre les insectes et les rongeurs (chapitres 2.4 et 2.5).
- Essayer de garder l'air de ventilation stérile, frais et sec.

4.4.4 Aspects chimiques

Comme nous l'avons déjà vu en chapitre 1.2. et comme c'est résumé à la figure 4.4.2, la vie microbienne est arrêtée à une a_w de 0,70. Malheureusement, il y a d'autres types de détérioration qui peuvent avoir lieu en-dessous de cette limite. On a d'abord trouvé qu'entre 0,70 et 0,40 il y a 3 types de mécanismes de détérioration :

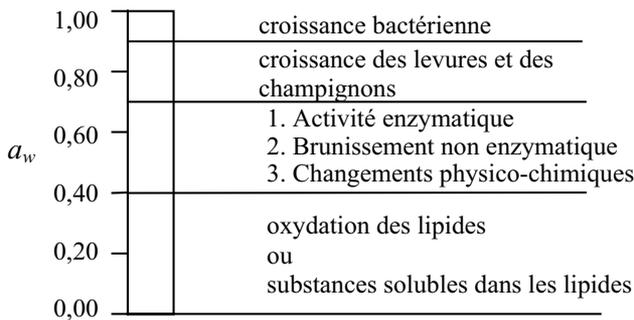
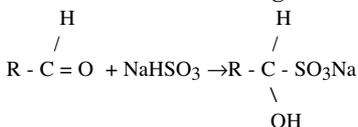


Figure 4.4.2
L'effet de l' a_w sur les facteurs de détérioration

- *Activité enzymatique* : par exemple l' a_w de 0,70 à 0,40 paraît idéale pour l'activité des peroxydases, des catalases et des oxydases d'acide ascorbique dans les produits végétaux; et des lipases et polyphénol oxydases dans les produits comme la farine et la viande. On essaye d'inactiver les enzymes avant le séchage par blanchiment.
- *Brunissement non enzymatique*. Ici, on se rappelle principalement les réactions de Maillard entre les groupes aminés libres et des substances réductrices (saccharides, cf. 1.2.4). On essaye généralement d'éviter ce brunissement par injection de SO_2 gazeux ou par addition de NaHSO_3 (bisulfite) pendant le blanchiment des légumes et des pommes de terre :



On bloque le groupe réducteur et on évite la réaction de Maillard. On applique des concentrations de 200 - 1000 mg de SO_2 / 100 grammes de matière sèche, afin de garder la couleur et de mieux conserver la vitamine C. Une autre possibilité consiste en l'élimination du glucose par addition d'une petite quantité de l'enzyme glucose-oxydase. Cette possibilité s'applique à la viande et au blanc d'oeuf (le glucose est oxydé en acide gluconique).

- *Changements physico-chimiques* : Les changements physico-chimiques qui peuvent avoir lieu ne sont pas encore très bien connus. On a trouvé des changements de la structure colloïdale, qui ont rendu difficile la reconstitution des aliments séchés (pouvoir d'absorption de l'eau pendant la préparation). D'ailleurs, dans le lait en poudre on a trouvé que le lactose peut se présenter sous une forme amorphe, qui est très hygroscopique sous forme de α -lactose, et qui rend alors difficile la conservation sous forme sèche.

Même à des activités de l'eau inférieures à 0,30, il y a des réactions qui sont favorisées, notamment l'oxydation des matières grasses. Le rancissement est une forme de détérioration qui est causée par l'oxydation et la saponification des corps gras. Ainsi, l'oxydation des caroténoïdes (par exemple au niveau des carottes) est favorisée par une a_w inférieure à 0,30. On peut freiner cette oxydation par emballage sous vide, ou sous un gaz inerte, tel que N_2 ou CO_2 .

4.4.5 Aspects théoriques du séchage

En principe, on peut sécher un produit par l'application de 4 méthodes :

- Séchage à l'air courant.
- Séchage soit sur une plaque chauffante, soit en combinaison avec un vide.
- Séchage par radiation (solaire infrarouge).
- Séchage diélectrique (courant alternatif de haute fréquence).

En pratique, la plupart des séchoirs marchent à l'aide du premier système. Pour cette raison, nous traiterons des aspects théoriques les plus importants du séchage à l'air courant.

Nous avons déjà vu au chapitre 1.2 que l' a_w d'un aliment est déterminée par la température. Elle est aussi influencée par l'humidité : une augmentation de l'humidité cause une augmentation de l' a_w . La relation entre a_w et humidité est présentée sur la figure 4.4.3. La courbe s'appelle "isotherme de sorption".

Il est maintenant clair qu'avec une température et une humidité données, l' a_w est fixée (flèche 2, figure 4.4.4). Comme nous l'avons vu sur la figure 4.4.3, les isothermes varient beaucoup pour les divers aliments (flèche 1, figure 4.4.4).

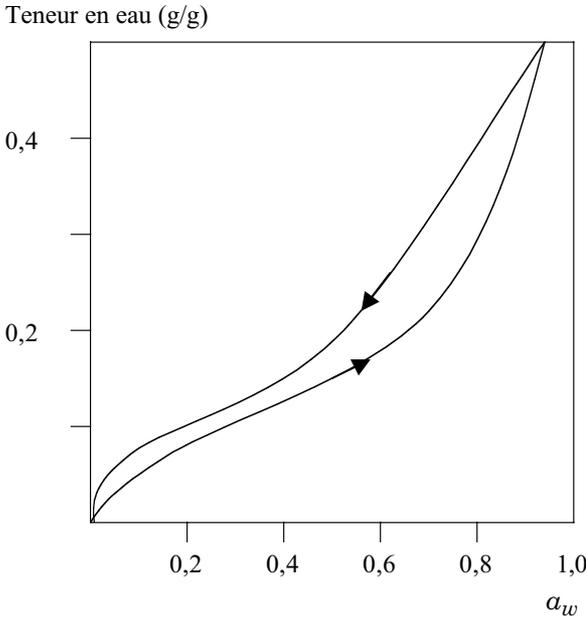


Figure 4.4.3
Exemple d'une isotherme de sorption (cas de l'amidon)

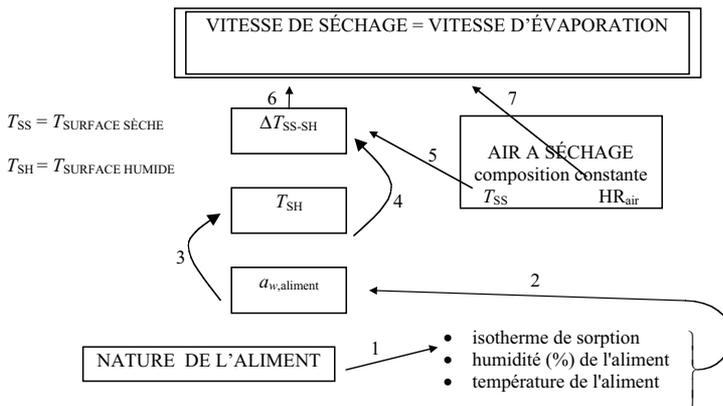


Figure 4.4.4
Schéma d'interaction

Examinons maintenant le cas théorique suivant : Nous avons un bac contenant de l'eau, qui est placé dans un courant d'air non saturé en eau. L'air et l'eau ont la même température (Figure 4.4.5). P_{H_2O} étant supérieure à $P_{courant}$, l'évaporation de l'eau a lieu. La chaleur d'évaporation est retirée de l'eau. La température de l'eau baisse. A cause de la différence de température, il y aura un courant de chaleur de l'air à l'eau. Enfin, s'effectue une situation d'équilibre où l'eau a une température qui est inférieure à $T^\circ C$ et qui s'appelle "température de surface humide (T_{SH})". L'autre température (de l'air) est appelée "température de surface sèche (T_{SS})". Quelques exemples sont présentés dans le tableau 4.4.2.

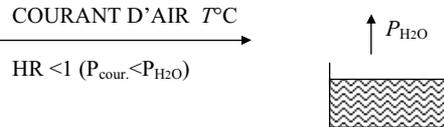


Figure 4.4.5
Evaporation de l'eau

Tableau 4.4.2

Relation entre la température et l'humidité relative (H.R.) de l'air

Humidité de l'air (%)	Température de la surface sèche (T_{SS}) (°C)	H.R. de l'air	Température de la surface humide (T_{SH}) (°C)
1	20	0,67	16
1	50	0,14	25,4
1	100	0,016	35,5
1	300	-	54
10	100	-	55
10	300	-	66

Dans le cas théorique, l'eau peut s'évaporer librement. Au contraire, dans les aliments, l'eau est plus ou moins active (exprimé par H.R.). La relation entre H.R. et la température T_{SH} est illustrée dans le tableau 4.4.3.

Tableau 4.4.3

Relation entre H.R. et T_{SH} d'un aliment donné

	EAU	ALIMENT 1	ALIMENT 2
H.R.	1,00	0,90	0,50
T_{SH} (°C)	25,4	26,8	34,0
Vitesse d'évaporation	100%	94%	65%

Courant d'air à Hum. 1% ; H.R. = 0,14 ; Température T_{SS} = 50°C.

Nous voyons qu'avec une diminution de l'H.R. l'eau est moins active. Il en résulte que la température T_{SH} reste plus élevée. Cette interaction est illustrée par la flèche 3 dans la figure 4.4.4. Enfin, la vitesse de séchage est déterminée par la différence des températures T_{SS} et T_{SH} (flèches 4, 5, 6 dans la figure 4.4.4). Une augmentation de $\Delta T_{SS,SH}$ cause une accélération de la vitesse d'évaporation. La situation finale d'équilibre est réalisée quand le produit atteint l'H.R. de l'air (flèche 7 dans la figure 4.4.4). La température du produit devient alors T_{SS} . En pratique, on termine le séchage longtemps avant ce moment final, parce que la plupart des aliments ne peuvent pas supporter des températures aussi élevées.

4.4.6 Quelques types de séchoirs

Parmi le grand nombre des différents types de séchoirs existants, beaucoup fonctionnent suivant les mêmes principes. Selon leurs principes de fonctionnement, nous pouvons classer les séchoirs en plusieurs groupes. Parmi les plus utilisés, citons :

4.4.6.1 Séchoirs pour matières solides

Séchoirs discontinus :

Parmi les séchoirs discontinus, nous traiterons des deux types suivants : la touraille et l'étuve à sécher.

La touraille (Figure 4.4.6) est le type de séchoir le plus simple. Elle consiste en un fond perforé. L'air de séchage est injecté par les trous et traverse le matériel. On utilise souvent la touraille pour les matières flottantes (graines, fruits, légumes, café). On trouve surtout les tourailles dans les usines de petite capacité, qui trai-

tent une grande variété de types de produit. Les tourailles ont des inconvénients, mais elles sont simples et peu coûteuses. Les inconvénients des tourailles sont la difficulté de garder le matériel homogène, la mauvaise répartition de la chaleur, et le bas rendement de la chaleur.

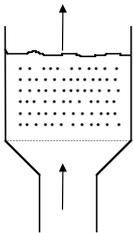


Figure 4.4.6

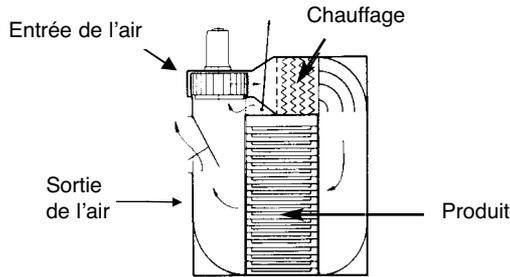


Figure 4.4.7
Étuve à sécher avec recirculation de l'air et chauffage électrique de l'air

L'étuve à sécher (figure 4.4.7) est plus universelle. On l'utilise par exemple pour sécher de la viande, du poisson, des légumes, des fruits, du thé, du tabac, etc. On utilise souvent des étagères métalliques pour y étendre les produits. Dans les installations modernes, on peut faire recycler une partie de l'air afin d'améliorer le rendement de la chaleur.

Séchoirs continus :

Nous traiterons des séchoirs à tunnel, à ruban, et à cylindre rotatoire, qui sont utilisés dans les usines de grande capacité. La période nécessaire au séchage varie selon les situations, de 15 minutes à quelques heures. Ensuite, nous traiterons du séchage pneumatique, méthode très moderne et très rapide (période de séchage de quelques minutes).

Séchoir à tunnel (Figure 4.4.8). Dans ce type de séchoir, le tunnel contient une série de chariots sur lesquels le produit est étendu. Les chariots sont transportés lentement de l'entrée à la sortie, où le produit termine son séchage. Dans les séchoirs de type plus complexe, on fait recycler l'air de séchage.

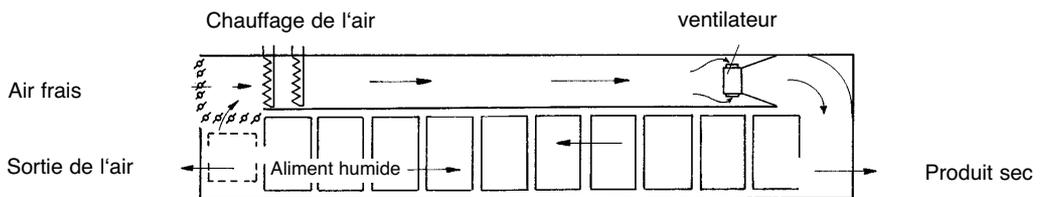


Figure 4.4.8
Séchoir à tunnel
(Courants opposés)

Séchoir à ruban (Figure 4.4.9). Le produit est transporté au travers du séchoir par un ruban perforé aussi lentement que dans le séchoir à tunnel. Ici, le matériel est transporté de haut en bas, mais il existe encore un grand nombre de possibilités pour le transport du matériel, la direction de l'air à sécher, la circulation de l'air, etc.

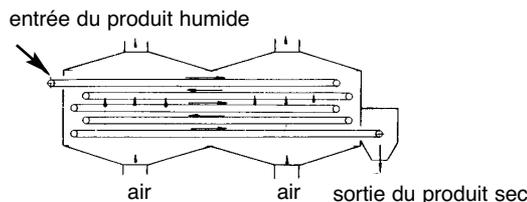
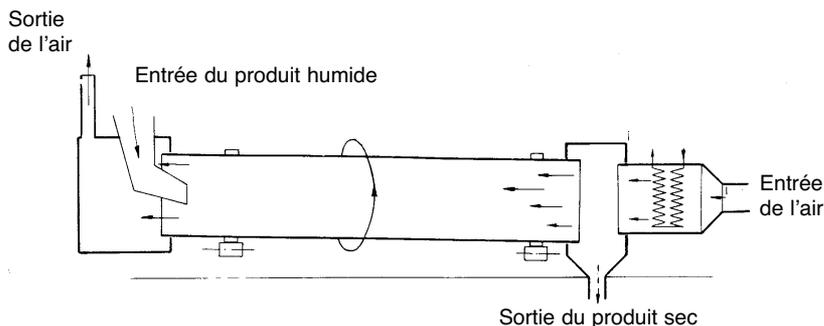


Figure 4.4.9
Séchoir à ruban

Séchoir à cylindre rotatoire (Figure 4.4.10). On utilise les cylindres rotatoires pour sécher des produits qui flottent facilement et qui ne collent pas. Dans le cylindre, on a construit un mécanisme qui mélange les produits de façon à ce qu'ils soient exposés de manière égale à la chaleur. Ces produits sont ensuite transportés à travers le séchoir grâce à une faible inclinaison du cylindre.

Figure 4.4.10
Séchoir à cylindre rotatoire



Nous avons ainsi vu les trois types de séchoirs les plus couramment utilisés pour le séchage des produits dont le séchage est lent. La période de séjour du produit dans ces types de séchoir peut varier de 15 minutes à quelques heures. Pour le séchage des produits qui sèchent rapidement, on peut appliquer le séchage pneumatique.

Séchoir pneumatique, 1^{er} cas : technique pour des poudres. On mélange la poudre (par exemple l'amidon) avec l'air à sécher à l'aide d'un désintégrateur (cf. chapitre 3.6.). Ensuite, le mélange passe à travers un système tubulaire et la poudre est séchée et transportée en même temps.

Séchage pneumatique, 2^{ème} cas : technique "Lit Fluide". Un lit fluide est formé par des particules de matière solide, qui sont transportées par un coussin pneumatique. Ce coussin pneumatique est formé par des injecteurs d'air chaud à sécher. Le matériel va se comporter comme un liquide (fluidisation). Par cette méthode, on obtient un mélange intensif sans dommage mécanique. On peut appliquer cette technique pour sécher de nombreux produits, par exemple des graines, du sel, du café, des légumes, etc.

4.4.6.2 Séchoirs pour matières liquides (solutions, suspensions, émulsions)

Avant de sécher ces liquides, on les concentre fortement par évaporation, parce que l'ensemble : concentration et séchage du produit concentré, est meilleur marché que le séchage du liquide dilué. Un autre avantage est la vitesse de séchage, qui est plus grande pour un concentré visqueux que pour un liquide dilué.

Séchoir à atomisation. (Figures 4.4.11 et 4.4.12) Le produit liquide est pulvérisé dans une grande chambre avec de l'air à une

température assez élevée. Malgré cela, la température du produit ne dépassera pas 50°C (température de la surface humide). Pour s'assurer un séchage régulier du produit, il faut que les gouttes soient de même grosseur (vitesse égale de chute). Il est souvent difficile d'obtenir des gouttes de diamètre homogène (le diamètre souvent utilisé est de 0,05 mm). Le séchage à pulvérisation est surtout appliqué pour le lait, mais aussi pour les oeufs, les extraits de café, la farine de pomme de terre, le sang, etc. La vitesse de séchage est de l'ordre d'une 1/2 minute.

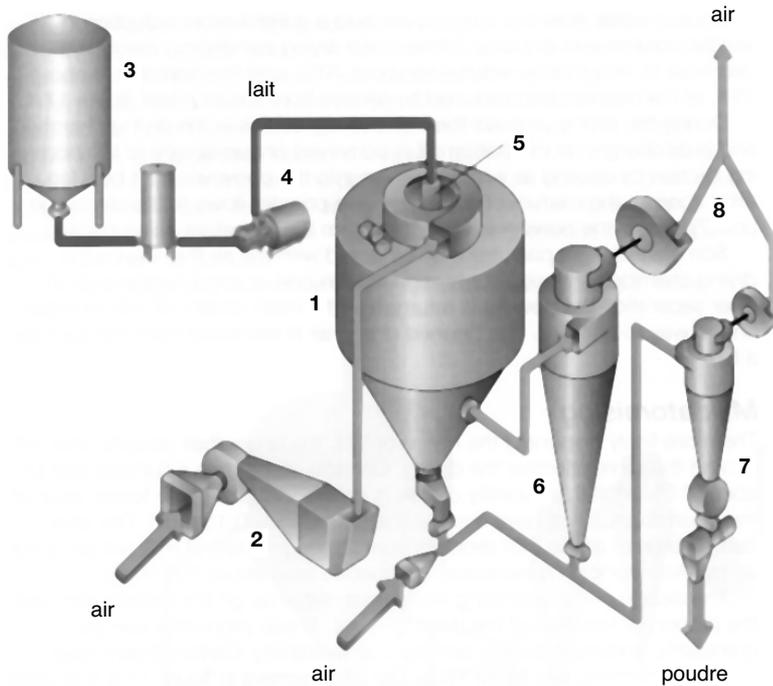


Figure 4.4.11
Séchoir à atomisation conventionnel

- (1) Chambre à séchage
- (2) Chauffage de l'air
- (3) Réservoir au lait concentré
- (4) Pompe à haute pression
- (5) Atomiseur
- (6) Cyclone principal
- (7) Système de transport du cyclone
- (8) Ventilateurs et filtres à air

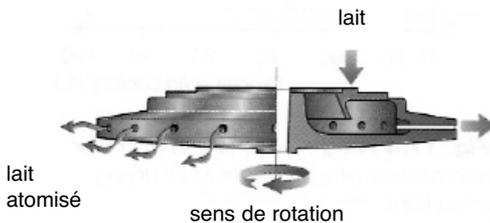


Figure 4.4.12
Atomiseur à disque pour le lait

Séchoir à cylindre (rouleau). (Figures 4.4.13 et 4.4.14). Ici, le produit liquide est étendu sur un rouleau qui est chauffé à l'intérieur à l'aide de vapeur. La pellicule du produit séché est enlevée du rouleau par un couteau "docteur". Comme avec le séchage à pulvérisation, la vitesse de séchage est élevée et, pour cette raison, on

peut appliquer cette technique au séchage des produits sensibles à la chaleur. Le séchoir à rouleau est utilisé pour les mêmes produits que ceux cités pour le séchoir à pulvérisation. D'ailleurs, on peut l'appliquer pour des produits qui sont plus visqueux.

Figure 4.4.13
Séchoir à cylindre

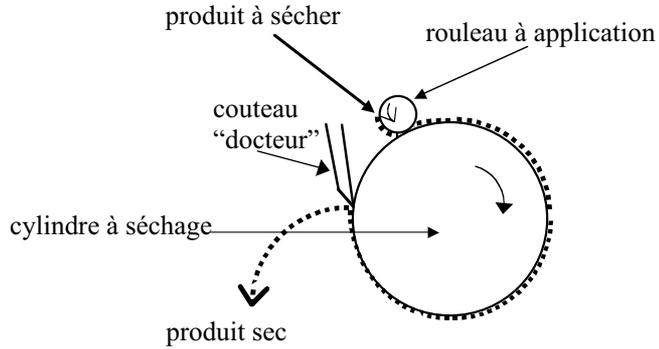
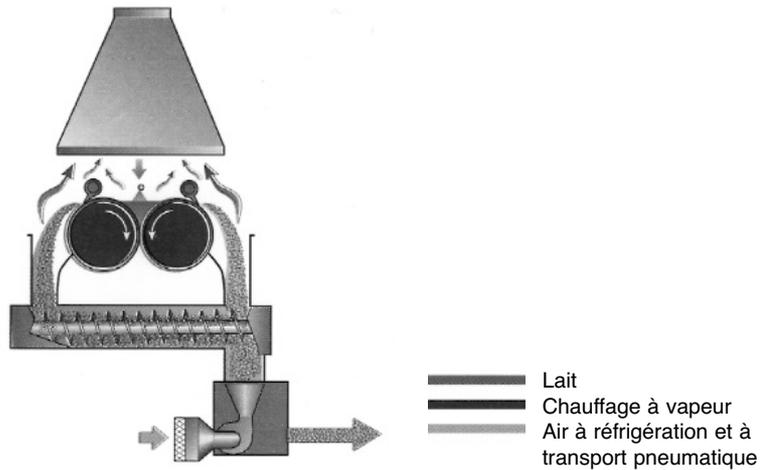


Figure 4.4.14
Principe d'un séchoir à double cylindre à alimentation continue



4.4.7 La conservation par lyophilisation ou le séchage par sublimation

4.4.7.1 Introduction

Cette technique est utilisée aussi bien pour les matières solides que pour les produits liquides. C'est une méthode de séchage assez différente des autres techniques. Le séchage par sublimation est une méthode de conservation où l'on retire l'humidité du produit par sublimation des cristaux de glace dans le produit congelé. L'eau passe alors directement de la phase solide (glace) à la phase gazeuse (vapeur d'eau).

Il y a des différences essentielles entre le séchage par sublimation et le séchage classique (où l'eau est évaporée) qui peuvent influencer considérablement l'aspect extérieur, la couleur, l'odeur,

la valeur nutritive, les propriétés de réhydratation et la consistance du produit.

Séchage classique : Au cours du séchage, une partie de l'humidité de la phase liquide est transportée du centre vers l'extérieur du produit où a lieu l'évaporation. Les substances solubles dans l'eau sont amenées vers la périphérie où, pendant l'évaporation progressive, les concentrations augmentent. À cause de ces concentrations plus élevées et des hautes températures, des réactions non réversibles (détérioration) sont propagées. Le séchage, à partir de la phase liquide, cause un certain rétrécissement du produit qui, combiné à l'augmentation de concentrations des substances solubles, freine la vitesse de séchage et détériore les propriétés de réhydratation. Lors de la réhydratation du produit séché, le rétrécissement ne disparaît que partiellement; aussi, les substances solubles accumulées à la périphérie ne sont pas complètement ramenées au centre du produit par l'eau qui pénètre. Dès lors, la répartition de ces substances reste inégale après la réhydratation.

Séchage par sublimation : Pendant la congélation a lieu une séparation de l'humidité des substances solubles. L'eau cristallise sous forme de cristaux de glace, tandis que les substances qui étaient dissoutes sont fixées entre ces cristaux. Les substances ne se déplacent pas pendant le séchage, où la glace s'échappe du produit par sublimation. Un rétrécissement très restreint s'opère. Les réactions non réversibles sont fortement freinées par la basse température et le manque d'oxygène. Finalement le produit reconstitué a des propriétés qui ressemblent beaucoup plus à celles du produit original qu'à celles d'un produit séché reconstitué selon les techniques classiques.

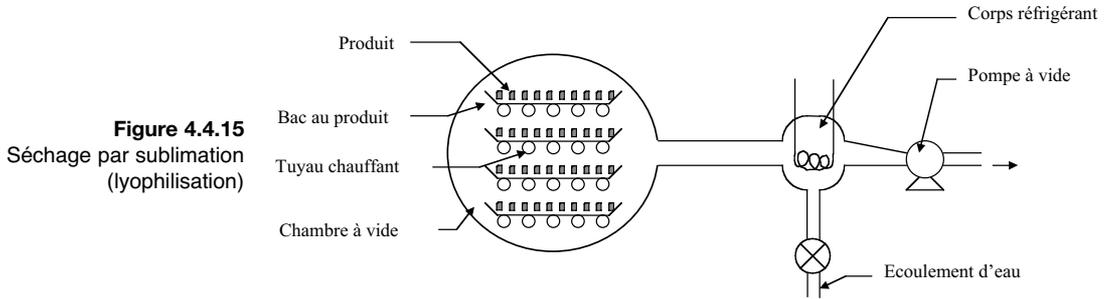
4.4.7.2 Exécution

Les traitements préalables au séchage par sublimation, selon les produits concernés, sont :

- un blanchiment afin d'inactiver les enzymes oxydantes, comme la polyphénol oxydase, qui causent le brunissement enzymatique.
- un traitement avec des substances qui fixent les arômes délicats, comme la pectine, l'amidon, ou certains types d'amidon modifié chimiquement.

Le séchage par sublimation, enfin, s'effectue comme suit : le produit congelé est réduit afin d'obtenir des particules de dimensions homogènes. Ces particules sont mises en bacs qui se trouvent dans la chambre à vide (Figure 4.4.15). La chaleur de sublimation est fournie par une tuyauterie dans laquelle on fait circuler de l'eau chaude. La vapeur d'eau résultant de la sublimation est condensée et congelée sur un corps réfrigérant. Le vide, maintenu dans le système, est assuré par une pompe à vide. Après que le séchage est terminé, la glace se trouvant sur le corps réfrigérant est liquéfiée et ensuite évacuée. Afin d'éviter tout risque d'oxyda-

tion ou tout autre type de détérioration, le produit est souvent emballé, sous une atmosphère de gaz inerte (exemple : l'azote, l'hélium), dans un emballage imperméable aux gaz.



4.4.7.3 Applications

Ce système assez cher ne peut être profitable pour le producteur que pour la conservation des produits dont le séchage ne peut être réalisé de manière aussi satisfaisante par un autre procédé. Quelques exemples de produits qui sont conservés par le séchage par sublimation : l'extrait de café (Nescafé), la viande de poulet, les champignons, le sérum de sang (applications médicales) et les cultures bactériennes (ensemencements aux fermentations, et applications scientifiques).

4.5 La conservation par l'addition de produits chimiques

4.5.1 Introduction

Comme nous l'avons vu, toutes les méthodes importantes de conservation causent des changements plus ou moins considérables dans les aliments. Afin de diminuer ces changements, qui sont souvent indésirables, on peut appliquer un traitement de conservation plus léger en combinaison avec l'addition de certains produits chimiques. L'action de ces produits chimiques consiste généralement dans la réduction de la croissance microbienne.

4.5.2 Classification des produits chimiques de conservation

Selon leurs modes d'action et les effets qu'ils causent dans les aliments, on peut classer les produits chimiques de conservation comme suit :

4.5.2.1 Les produits chimiques causant un changement de goût

Dans ce groupe, on trouve les produits qu'il faut ajouter en grandes quantités afin d'obtenir une action de conservation (qui ne sera d'ailleurs jamais de 100%). Du fait de ces concentrations éle-

vées (acides 1-5%, sel, sucre, alcool 5-50%) le goût du produit est souvent tellement modifié que l'on ne peut utiliser ces produits de conservation que dans des cas spécifiques. Les produits suivants sont classés selon leurs types d'action :

Diminution de l'activité de l'eau (a_w)

On obtient une diminution de l' a_w par l'addition de quantités appropriées de produits suivants :

- du sel (NaCl ou KNO₃), (poisson, viande)
- des sucres (sucre de canne, glucose, etc.), (fruits)
- de l'alcool, (fruits, boissons).

Diminution du pH

Le principe de l'action de conservation consiste dans la réduction de la multiplication des bactéries qui causent la putréfaction. Celles-ci ne peuvent plus survivre à des valeurs de pH inférieures à 4,5. Cependant, il y a encore d'autres micro-organismes qui sont aussi capables de survivre à des valeurs de pH inférieures à 3,0 (un certain nombre de levures et champignons, ensuite les bactéries acido-lactiques). L'effet est causé par les acides non-dissociés. La diminution du pH s'effectue par :

- l'addition d'acide, surtout l'acide acétique (mise en vinaigre des olives, de la viande), mais aussi l'acide citrique, tartrique, lactique et propionique.
- la formation d'acide par des micro-organismes, surtout la formation de l'acide lactique dans les produits fermentés tels que les céréales fermentées, les saucisses dures, la choucroute, le babeurre, le yaourt, le fromage.

$$pH_{\text{ext}} < pK_a \quad pH = 4,2$$

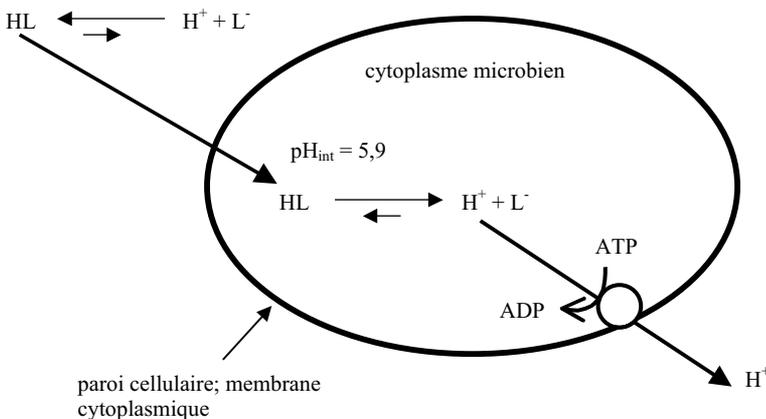


Figure 4.5.1

Schéma de l'effet antimicrobien des acides non-dissociés

HL = acide lactique non-dissocié;
 L⁻ = lactate (dissocié);
 pH_{ext} = pH à l'extérieur;
 pH_{int} = pH intracellulaire;
 pK_a = constante de la dissociation de l'acide.

Dans un milieu acide, les acides non dissociés (acide lactique par exemple) ont un effet anti-microbien (montré par la figure 4.5.1). Les acides non dissociés n'ont pas une charge électrique et peuvent donc passer à travers la membrane cytoplasmique, celle-ci est

seulement perméable à des substances non chargées. Dans la cellule le pH intracellulaire est supérieur au pH extracellulaire, l'acide se dissocie en formant des ions H^+ . Pour la cellule il faut que les ions H^+ soient éliminés, ce processus consomme de l'énergie et par conséquent, la croissance de la cellule est inhibée.

4.5.2.2 Les produits chimiques ne causant pas de changement de goût

Dans ce groupe, on trouve les produits qui ont une action de freinage du métabolisme des micro-organismes. Les enzymes responsables du métabolisme sont bloquées. Parce que les enzymes exercent leur action à des concentrations basses, les inhibiteurs doivent aussi avoir une grande influence à de basses concentrations (0,001-0,1 %). C'est pour cette raison qu'ils ne sont pas capables de changer le goût des aliments. En principe donc, ces produits auront une utilisation universelle. Cependant, beaucoup de ces substances de conservation sont nuisibles à la santé humaine. Avant que le produit de conservation soit admis dans les aliments, il faut démontrer :

- L'effet de conservation de ce produit dans l'aliment donné.
- L'innocuité du produit pour la santé humaine. Pour cela, il faut démontrer à l'aide d'expériences de longues durées

Tableau 4.5.1
Quelques produits de conservation

Admissibilité dans les aliments	Produits chimiques de conservation (minéraux ou synthétiques)			Antibiotiques (d'origine biologique)	
	Acides et sels pour les aliments à pH < 5	Esters de	Divers	Antibactériens	Inhibiteurs de levures et de champignons
illimitée	acide propionique ac. sorbique ac. acétique ac. lactique ac. citrique ac. tartrique glycérol NaCl		sels de saumure: NaCl substances de la fumée CO ₂ sous pression sucre alcool éthylique fines herbes condiments huiles essentielles		
entre certaines limites (voir tableau 4.5.2)	ac. sulfureux (SO ₂) ac. benzoïque			tétracyclines (Etats-Unis) nisine	
pas encore suffisamment examinées pour être admises	ac. salicylique ac. formique ac. peracétique		argent et sels d'argent hydrogène peroxyde nitrates biphényl	pénicilline streptomycine chloramphénicol viomycine erythromycine subtiline polymyxine B	mycosubtiline rimocidine fradisine nystatine candidine iturine filipine
interdits, toxiques	ac. fluorhydrique ac. borique ac. nitreux ac. parachlorobenzoïque ac. déshydroacétique	ac. p-hydroxybenzoïque ac. monochloroacétique ac. monobromoacétique	formaldéhyde chloramine chloropicrine composé d'azotequatemaire thiourée sels de mercure nitrites		actidion = cycloheximide

(réalisées sur des animaux ou tissus vivants) que les produits ne sont ni d'une toxicité aiguë ou chronique, ni carcinogènes. Le tableau 4.5.1 présente quelques produits de conservation parmi les plus connus.

En principe, l'utilisation des antibiotiques comme agents de conservation est évitée, car on craint le développement de la résistance des micro-organismes. Il est bien connu que certains micro-organismes pathogènes, qui sont traités cliniquement à l'aide d'antibiotiques, développent à la longue une résistance contre ces antibiotiques. Dans ce cas, il faut changer le traitement et chercher un autre antibiotique actif. Quand on applique des antibiotiques à grande échelle comme produits de conservation, il y a un

	SO ₂ mg/kg = ppm		Acide benzoïque (ppm)	Tétracyclines (ppm)
	France	Angleterre	Angleterre	Etats-Unis
Produits de fruits:				
jus de fruits	100	350	600	
confiture		100		
fruits séchés	1000	2000		
Vin et bière:				
vin sans alcool		350	600	
vin	450	450		
bières	100	70	120	
Viande, poisson:				
crevettes	50		5000	5

Tableau 4.5.2

Quelques exemples de concentrations admises de 3 produits de conservation.

Produits de conservation et acides organiques:		
Numéro "E" (Europe)	Substance	CJA (Consommation journalière acceptable) par kg de poids de corps
200	Acide sorbique	25 mg
201	Na- sorbate	25
210	Acide benzoïque	5
220	SO ₂	0,7
223	Na-métabisulphite (Na ₂ S ₂ O ₅)	0,7
230	Bi-phényl	50 µg
234	Nisine	33 mg
236	Acide formique	3
240	Formaldéhyde	0,15
249	K-nitrite	0,2
260	Acide acétique	∞
270	Acide lactique	∞
280	Acide propionique	∞

∞ = illimitée

Tableau 4.5.3

Quelques additifs et les limites admissibles.

Produits antioxydants et acides organiques:		
300	Acide L- ascorbique	∞
320	Butylhydroxyanisol (BHA)	0,5
321	Butylhydroxytoluène (BHT)	0,5
330	Acide citrique	∞
334	Acide tartrique	30
338	Acide phosphorique	70

maximum de chance qu'un certain nombre de micro-organismes pathogènes développent une résistance contre plusieurs antibiotiques (ceux qui sont utilisés dans les aliments). Cela posera de réels problèmes en cas de maladie; pour cette raison, on a proposé l'utilisation de quelques antibiotiques dont on a démontré que les micro-organismes ne développent pas de résistance. Jusqu'à présent, il n'a pas encore été trouvé de tels antibiotiques, sauf les tétracyclines (rarement utilisées aux Etats-Unis). Par contre, certaines bactériocines comme la nisine sont appliquées dans les fromages. Le tableau 4.5.2 présente quelques concentrations admises de produits de conservation, qui ont une admissibilité entre certaines limites. Egalement, le tableau 4.5.3 montre quelques additifs, leur code "E" et les taux acceptables du point de vue toxicologique. Enfin, il faut remarquer qu'un certain nombre de pays exigent la mention des produits de conservation utilisés sur l'emballage du produit.

4.6 La conservation à l'aide de micro-organismes

Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre 2.6, la conservation à l'aide des micro-organismes (bioconserves) est presque toujours accompagnée de changements de goût et d'arôme. Pour cette raison, cette technique n'est appliquée que pour certains produits typiques. Il faut d'ailleurs remarquer que l'on ne peut garder de façon illimitée les bioconserves, surtout quand on change les conditions des produits.

4.6.1 En général, on peut classer les bioconserves comme suit :

4.6.1.1 *Bioconserves à pH bas*

Le pH bas est causé par la formation microbienne d'acide (le plus souvent l'acide lactique et/ou l'acide acétique). La concentration d'acide doit être assez considérable (2 - 4%). Même dans cette condition, il faut souvent ajouter une quantité de sel (NaCl) afin d'améliorer la conservation.

Exemples : choucroute, cornichons, choux-fleurs, olives, vinaigre, yaourt, fromage.

4.6.1.2 *Bioconserves à alcool*

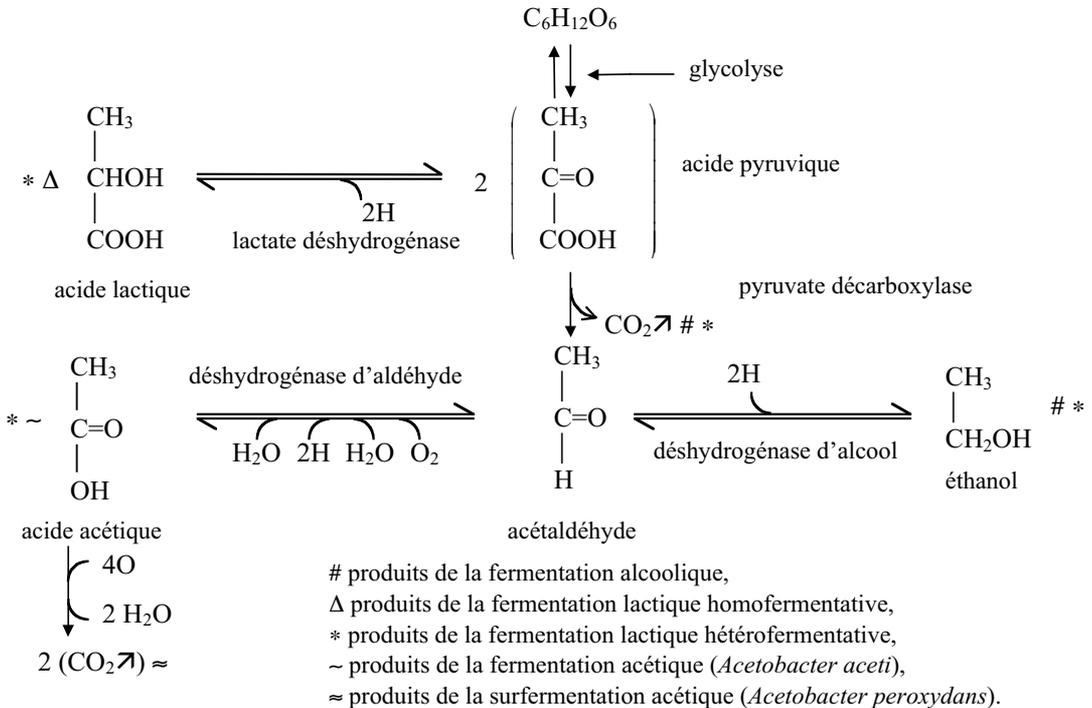
L'alcool est formé, avec la formation de CO₂, pendant la fermentation alcoolique des sucres. Parallèlement, pendant la fermentation des jus de fruits, se déroulent plusieurs transformations (bio) chimiques dont les produits contribuent à la saveur et l'arôme caractéristiques du vin. La conservation du vin est assurée par l'acidité, le taux d'alcool et la présence des sucres qui sont encore fermentescibles. On peut améliorer la conservation du vin par pasteurisation, par bacto-filtration (on élimine les micro-organismes),

ou par addition de produits chimiques (SO₂, acide benzoïque, voir section 4.5).

4.6.2 Rappel biochimique sur la formation des divers produits à partir de C₆H₁₂O₆ (glucose)

Les voies métaboliques à partir du glucose sont présentées sur la figure 4.6.1. Dans le contexte de cette section, on fait la distinction entre les fermentations alcooliques, lactiques et acétiques.

Figure 4.6.1
Métabolisme microbien du glucose



4.6.2.1 La fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique est un procédé anaérobie, dans lequel les monosaccharides sont décomposés par les levures dans une chaîne de réactions enzymatiques qui s'appelle la glycolyse. Comme produits de la glycolyse on aura, à partir de 1 molécule de glucose, 2 molécules d'acide pyruvique. Ces 2 molécules de pyruvate sont transformées en 2 molécules de CO₂ gazeux et 2 molécules d'acétaldéhyde, qui acceptent 4H pour former 2 molécules d'éthanol.

4.6.2.2 La fermentation lactique

La fermentation lactique (un processus anaérobie) peut avoir lieu à partir du glucose aussi bien qu'à partir du lactose (par les micro-organismes qui peuvent acidifier le lait). Toutes les fermentations lactiques ont comme point commun la formation de pyruvate. A partir du pyruvate, il y a trois possibilités :

La fermentation lactique homofermentative obligatoire.

Pendant la fermentation homofermentative n'a lieu que la formation d'acide lactique. Ce type de fermentation est effectué par exemple par *Lactococcus lactis* et *Lactobacillus salivarius* ssp. *bulgaricus*.

La fermentation hétérofermentative obligatoire.

Au cours de ce type de fermentation, il se forme non seulement de l'acide lactique, mais aussi du CO₂, de l'acide acétique et de l'éthanol. Cette fermentation est effectuée par exemple par *Lactobacillus fermentum* et *Leuconostoc citrovorum*.

Pour le développement de l'arôme et du goût, il est très important d'assurer une répartition équilibrée des 2 types de fermentation.

La fermentation hétérofermentative facultative.

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

4.6.2.3 La fermentation acétique

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

4.7 La conservation par la radiation ionisante**4.7.1 Principe**

On a trouvé déjà en 1904 que la radiation ionisante, émise par une source radioactive, par exemple le Cobalt⁶⁰, a une action mortelle sur les micro-organismes. Les grands avantages de l'application de la radiation sont :

- que la température au cours de la stérilisation n'augmente que de 10°C.
- que les rayons ont un grand pouvoir de pénétration; ce qui implique que l'on peut traiter en une fois de grands emballages remplis d'aliments.

Depuis 1950, de nombreuses recherches scientifiques ont été faites sur le sujet de la radiation, et on a trouvé que le système de radiation est très souhaitable comme traitement de quelques aliments spécifiques. D'autre part, on a pu constater que le procédé de radiation pourrait poser certains problèmes.

4.7.2 Problèmes potentiels

Il y a plusieurs inconvénients liés à cette technologie :

- Accumulation des résidus radioactifs dans l'environnement;
- Changements indésirables d'odeur et de goût : la stérilisation par radiation ionisante n'est pas appropriée pour beaucoup d'aliments, parce que sous l'influence de l'énergie ionisante ont lieu des réactions de formation de radicaux et d'oxydation, qui altèrent l'odeur et la saveur des aliments;
- Perte de la valeur nutritive : les protides, les lipides et les sucres ne sont pas détruits par la radiation. Néanmoins, l'application des rayons peut amener une destruction de quelques vitamines (par exemple la thiamine);
- Risques microbiologiques : l'application de rayons ionisants accélère la formation de mutants de micro-organismes qui sont résistants à la radiation. Cela introduit des risques sanitaires, surtout avec *Clostridium botulinum* type E, micro-organisme très dangereux;
- Coûts : les coûts d'installation, de mise en marche, et de protection de l'homme contre les effets nuisibles des rayons radioactifs sont élevés.

4.7.3 Sécurité

L' O.M.S. a approuvé la radiation ionisante à une dose inférieure ou égale à 10 kGy, ce qui est adéquat pour la destruction des bactéries végétatives (formes non-sporulées).

4.7.4 E-beam (Rayon d'électrons accélérés)

A présent, on développe des accélérateurs d'électrons, avec lesquels on est capable de créer un rayon ionisant sans utiliser une source radioactive. C'est un développement important qui permettra l'utilisation de la radiation comme méthode inoffensive sans avoir les problèmes de résidus radioactifs dans l'environnement.

4.7.5 Application

Etant donné les diverses restrictions de la stérilisation par radiation ionisante et le traitement E-beam, ce procédé n'est applicable que dans certains cas comme :

- Fourrage : la présence de Salmonelles dans les abattoirs est un risque pour la santé humaine. La quantité de micro-organismes du genre *Salmonella*, amenée par le bétail aux abattoirs, peut être diminuée par l'utilisation de fourrage débarrassé de ce micro-organisme par radiation;
- Viande et volaille congelées : la seule méthode pour décontaminer la viande et la volaille sous forme fraîche est l'application de la radiation au produit congelé. Le produit reste congelé et dans certaines conditions appropriées, ce n'est pas dangereux pour la santé;

-
- Fruits et légumes : par l'utilisation de très petites quantités d'énergie rayonnante, on peut freiner les processus de maturation des tissus végétaux. Par exemple, on peut freiner la maturation des bananes destinées à l'exportation grâce à la radiation effectuée à une dose très faible.

ASPECTS DE QUALITÉ

5.1 La qualité des aliments : généralités

La qualité des aliments est de toute évidence très importante, mais en même temps c'est une notion qui est un peu vague. Une définition très générale est la suivante : la qualité des aliments peut être définie comme étant la recherche de la satisfaction du désir du consommateur.

L'évaluation de la qualité implique des facteurs aussi bien objectifs que subjectifs, et ces facteurs sont parfois cachés, c'est-à-dire invisibles pour le consommateur. Les facteurs subjectifs sont en effet les propriétés organoleptiques, c'est-à-dire les propriétés qui sont perceptibles avec les organes des sens. Ce sont notamment la couleur (perceptible avec les yeux), le goût (la langue), l'arôme (le nez et la langue), l'apparence (les yeux et les mains), l'ouïe (les oreilles). Aussi subjectifs sont des facteurs psychologiques déterminés par la culture et les habitudes, l'appréciation de la manière de produire et finalement le coût. Ces facteurs sont subjectifs parce que chaque homme peut les évaluer de manière différente.

Les facteurs objectifs sont des choses comme la détérioration, la salubrité (parfois cachée pour le consommateur), la stabilité et la valeur nutritionnelle (cachée pour le consommateur). Ils sont objectifs parce qu'on peut mesurer ces facteurs avec des instruments. On ne peut pas complètement séparer les facteurs subjectifs et les facteurs objectifs. Par exemple, une détérioration chimique comme l'oxydation peut avoir des conséquences sur le goût et l'arôme.

La détérioration peut être de nature chimique : par exemple, l'oxydation, la réaction de Maillard; de nature biochimique : par l'action des enzymes; de nature physique : par exemple, la sépara-

tion, la sédimentation (des phases dispersées); de nature micro-biologique : par l'action des micro-organismes (bactéries, levures, moisissures).

La salubrité est déterminée par la présence dans l'aliment d'agents toxiques, de micro-organismes pathogènes, d'allergènes, de contaminants chimiques.

La valeur nutritionnelle est déterminée par la teneur en calories (énergie), la teneur en protéines/acides aminés indispensables, la teneur en acides gras indispensables, la teneur en vitamines, la teneur en sels minéraux, la teneur en oligo-éléments, la digestibilité et la biodisponibilité.

La stabilité est l'aptitude du produit à ne pas s'altérer trop rapidement. Les conditions d'entreposage doivent être prises en compte. En effet on peut dire que la détérioration est la perte de la qualité.

Le but de la technologie alimentaire est de produire des aliments de bonne qualité. En ce qui concerne la production, cette qualité est déterminée par deux facteurs, la qualité du **plan** de fabrication, et la qualité de la **fabrication** elle-même. Le plan de fabrication est aussi dépendant de la chaîne de production des aliments (Figure 5.1.1).

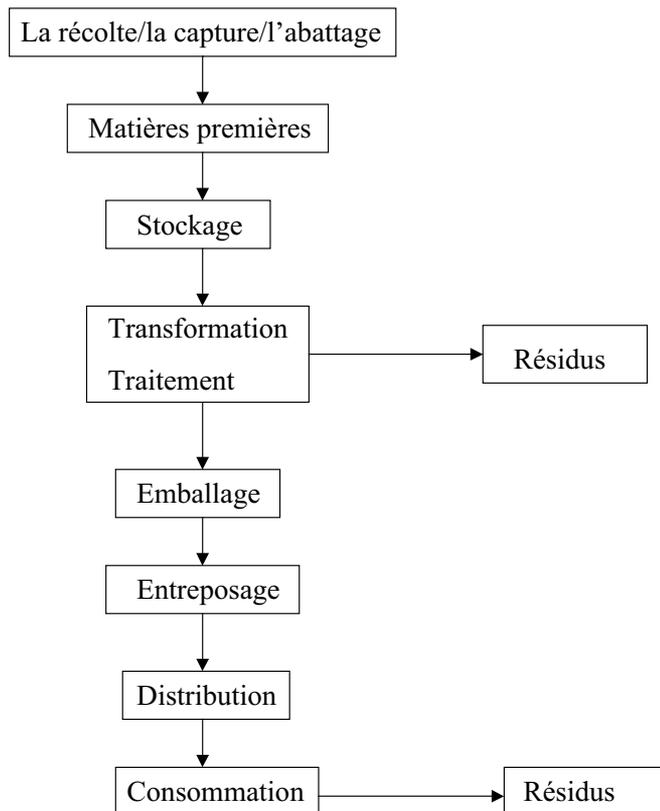


Figure 5.1.1
La chaîne de production
des aliments

Chaque maillon de la chaîne est important pour la qualité, notamment :

- la qualité des matières premières,
- la qualité de la fabrication,
- la qualité de la distribution et du stockage,
- la qualité de la gestion d'entreprise

Lorsque l'organisation est plus grande, la logistique (la gestion et le processus de stockage et de distribution) devient plus importante.

Une question importante est comment on peut mesurer la qualité. Les facteurs objectifs sont mesurables par des analyses microbiologiques, chimiques, organoleptiques, physiques. Pour l'interprétation des résultats d'analyse on a besoin des méthodes statistiques. Aussi, la gestion est importante parce que c'est peut-être nécessaire d'engager certaines actions.

Les quelques facteurs ci-dessous cités sont très importants pour la production des aliments en ce qui concerne la gestion de la qualité :

- le caractère périssable des aliments : hygiène, temps de passage dans la chaîne ;
- la santé des consommateurs : les micro-organismes pathogènes, les résidus/contaminants des agents chimiques (biphényles polychlorés [en Anglais : PCB], des métaux tels que Cd, Zn, Pb, etc). Il faut que le technologue prenne conscience que les aliments sont consommés «pour vivre».
- la diversité des fournisseurs,
- la variabilité des matières premières en fonction des saisons,
- l'échelle de production,
- l'importance de la valeur ajoutée,
- la réglementation en vigueur

Une autre manière de décrire la qualité est l'utilisation des facteurs dits extrinsèques ou intrinsèques. Les facteurs extrinsèques sont des facteurs qui ne sont pas directement liés à l'aliment lui-même; par contre, les facteurs intrinsèques sont liés directement à l'aliment (Figure 5.1.2).

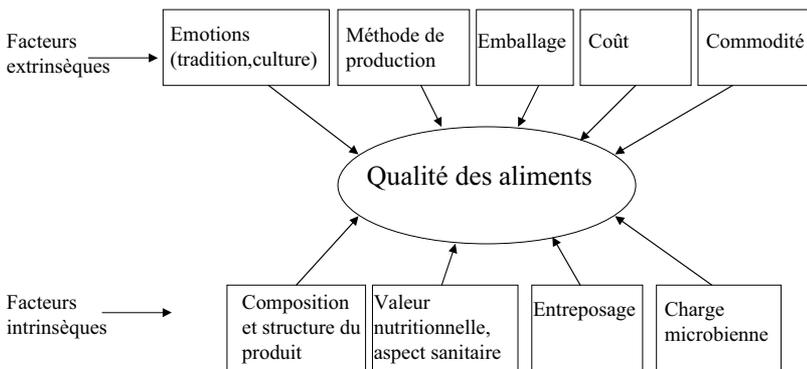


Figure 5.1.2
Synthèse des facteurs influençant la qualité

Le but du chapitre 5 est de discuter les aspects de qualité mentionnés plus en détail, sauf la qualité microbienne qui a déjà été discutée dans le chapitre 2.

5.2 La qualité physique : texture, propriétés colloïdales, rhéologie

5.2.1 Introduction

Le mot texture désigne ce que nous percevons, ou parfois mesurons indirectement, des éléments structuraux présents dans les aliments, lorsque nous faisons subir à ces derniers des déformations mécaniques. La texture est extrêmement importante parce qu'elle détermine souvent l'acceptation ou le refus d'un aliment par le consommateur.

Il est impossible de la mesurer totalement avec des instruments. L'inconvénient de ces instruments est qu'ils mesurent uniquement certaines propriétés, tandis que d'autres leur échappent. En outre ces instruments ne peuvent pas intégrer les propriétés qu'ils mesurent comme le fait le consommateur.

Quelques exemples de mesures physiques utilisées pour l'évaluation de la texture sont :

- la viscosité et la plasticité qui déterminent la vitesse d'écoulement,
- l'élasticité,
- la dureté,
- la résistance et la charge de rupture à la traction, au cisaillement et à la compression,
- la charge nécessaire pour extraire un liquide (par exemple un jus de fruits),
- l'adhésivité.

La plupart des aliments sont hétérogènes et souvent à l'état colloïdal, les particules d'un constituant se trouvant dispersées dans une phase d'un autre constituant, avec une taille variant de 1 nm à 100 nm. Il existe deux types d'interaction :

- l'interaction lyophile : caractérisée par des interactions attractives entre la phase dispersée et la phase dispersante. Un exemple est une suspension d'amidon dans l'eau.
- l'interaction lyophobe : la phase dispersée et la phase dispersante sont non miscibles. Deux exemples sont le lait et le beurre.

Tableau 5.2.1
Types d'états colloïdaux

Phase dispersée	Phase dispersante	Type
gaz	fluide	mousse
fluide	gaz	brouillard
fluide	fluide	émulsion
solide	gaz	fumée
solide	fluide	poudre suspension

Le tableau 5.2.1 ci-dessus énumère les divers types d'états colloïdaux à deux phases non miscibles.

5.2.2 Classification des aliments du point de vue physique

Si l'on classe les aliments d'après leur texture on peut distinguer :

Les solutions : ont une viscosité plus ou moins élevée. Exemples : la bière, le vin, le coca, le jus de pomme, l'huile de table ; elles n'ont de structure qu'à l'échelle moléculaire. Quand elles sont très concentrées, elles forment une structure vitreuse (bonbons de sucre, bonbons acidulés).

Les suspensions : ce sont des solutions contenant des particules insolubles (fragments de cellules végétales, agrégats de protéines, grains d'amidon). Quelques exemples sont le jus d'orange, le lait, le lait de chocolat.

Les pâtes : sont semblables aux suspensions, à la différence que dans les pâtes les particules se touchent et forment un réseau. Des exemples caractéristiques sont la purée de tomate, la marmelade de pommes, le pâté de foie, le beurre d'arachide.

Les émulsions : sont soit des globules gras dispersés dans une phase aqueuse (huile/eau ou H/E), soit des globules d'eau dispersés dans l'huile (E/H). Il y a beaucoup d'aliments qui sont en effet des émulsions. Des exemples sont le lait et la mayonnaise (H/E), la margarine et le beurre (E/H).

Les mousses et écumes : elles sont constituées de bulles, représentant un grand volume d'air ou d'autres gaz, entourées de minces films liquides. Quelques exemples sont la mousse de bière, la crème glacée, les œufs à la neige, la mousse de chocolat, la mie de pain qui est formée par des bulles entourées par de minces films solides (gluten, amidon).

Les gels : constitués de réseaux de macromolécules dans une phase aqueuse. Quelques exemples sont les confitures, la gélatine, le pouding.

Les gels de particules : qui forment un réseau. Des exemples sont le yaourt, l'œuf cuit ou poché, la viande (fibreuse).

Il faut noter qu'il existe des mélanges de ces configurations mentionnées ci-dessus, tels que la glace (mélange d'une émulsion de globules gras, suspension des cristaux de glace, gels de particules de caséines, mousse de l'air), le fromage (mélange d'une émulsion, gels de particules), le pain (mélange de mousse et gels de particules), etc. Les propriétés des aliments sont dépendantes du type de configuration et des interactions au niveau colloïdal. Alors, une connaissance de base sur les colloïdes est nécessaire pour comprendre les propriétés physiques des aliments.

5.2.3 La stabilité et les interactions entre particules colloïdales

Etant donné qu'ils sont constitués par une dispersion de nombreuses particules, tous les systèmes colloïdaux possèdent des

interfaces de grande étendue entre les phases constituantes. Un rapport surface/volume élevé entraîne, en raison de la tendance à la diminution de l'étendue des interfaces, une grande instabilité thermodynamique et par conséquent une déstabilisation des systèmes colloïdaux.

Il existe trois mécanismes principaux de déstabilisation d'un système colloïdal :

a) **la séparation des phases** dans les cas où les phases présentent une différence de densité ; la sédimentation et l'écémage sont des exemples de séparation des phases.

b) **la floculation des particules** en cas d'attraction entre elles.

c) **la coalescence ou fusion** des particules entre elles

Pour la sédimentation (ou bien l'écémage) la chute sous l'influence de la pesanteur se fait à vitesse croissante jusqu'à ce que la force frictionnelle de résistance (due au milieu où se produit la chute) F_f (N) devienne égale à la force gravitationnelle F_g (N) :

$$(5.2.1) \quad F_f = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot V$$

$$(5.2.2) \quad F_g = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot g$$

La chute des particules sphériques de rayon r se fait à vitesse constante V (m s^{-1}) si $F_f = F_g$, c'est-à-dire quand la vitesse est constante

$$(5.2.3) \quad V = \frac{2}{9} r^2 \frac{(\rho - \rho_0)g}{\eta}$$

ρ =densité de la particule (kg m^{-3}), ρ_0 = densité de la phase dispersante (kg m^{-3}), g = accélération de gravité ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), η = viscosité de la phase dispersante (Pa s , ou Ns m^{-2}).

La sédimentation ou écémage est donc d'autant plus lente que la taille des particules est petite, que la différence de densité entre particules et phase dispersante est faible, et que la viscosité de la phase dispersante est élevée. On peut voir que l'effet du rayon est très grand, dû à r^2 . A titre d'exemple supposons que $\rho_0=1 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho=0,92 \text{ kg m}^{-3}$, $\eta = 0,002 \text{ Nsm}^{-2}$ (c'est-à-dire une viscosité double de celle de l'eau), $r=0,1 \text{ }\mu\text{m}$, on calcule donc une valeur $V=8,7 \times 10^{-13} \text{ m s}^{-1}$ ou 3 nm h^{-1} . Si $r=100 \text{ }\mu\text{m}$, les autres conditions étant les mêmes, on calcule $V=8,7 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ ou 3 mm h^{-1} , montrant donc le grand effet du rayon des particules. On peut utiliser la différence de densité entre particules et phase dispersante en technologie alimentaire pour séparer des phases. Par exemple, la séparation des globules gras du lait est réalisée pendant la production de la crème par centrifugation.

La floculation et la coalescence sont une conséquence de l'interaction entre particules, c'est-à-dire des forces d'attraction et de répulsion. La force d'attraction entre particules colloïdales s'appelle force de van der Waals et cette attraction est d'un type général. On peut décrire l'attraction entre particules sphériques en terme quantitatif comme une énergie :

$$V_A = -\frac{r \cdot A}{12 \cdot h} \quad (5.2.4)$$

V_A est l'énergie d'attraction (J), r le rayon des particules (m), h la distance entre les particules (m), et A est la constante de Hamaker (cf. figure 5.2.1.) La constante de Hamaker est caractéristique du matériel constituant les particules et elle varie entre $0,1 \times 10^{-20}$ et 2×10^{-20} J.

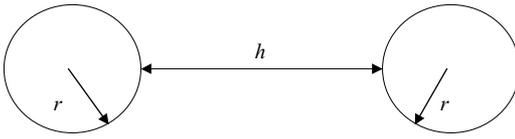


Figure 5.2.1

Deux particules avec rayon r séparées par une distance h

La répulsion entre particules est soit de type électrostatique, soit de type stérique. La répulsion électrostatique peut être décrite pour des particules sphériques comme une énergie V_R (J) :

$$V_R = 2\pi \cdot \epsilon \cdot r \cdot \psi_d^2 \exp(-\kappa \cdot h) \quad (5.2.5)$$

ϵ est la constante diélectrique (elle est égale à 80 pour l'eau, 3 pour l'huile, par exemple), ψ_d est la charge électrique (V), r le rayon des particules (m), $1/\kappa$ est une distance caractéristique dépendante de la concentration c des électrolytes avec une valence z ($1/\kappa$ est en nm si c est en mol/l) :

$$\frac{1}{\kappa} = 0,42 \frac{1}{\sqrt{c_i \cdot z_i^2}} \quad (5.2.6)$$

Une plus grande valeur pour $1/\kappa$ indique une répulsion plus forte. Le tableau 5.2.2 ci-dessous donne une idée de l'effet de la concentration c du NaCl ($z=1$) sur $1/\kappa$, et donc sur la répulsion électrostatique entre des particules chargées.

L'effet de la valeur de la valence z est très fort à cause de z^2 . Le tableau 5.2.3 en donne une idée. La conséquence est que la floculation est promue si on a des électrolytes avec une valence plus élevée. Dans le lait, par exemple, la présence de Ca^{2+} est favorable pour la précipitation de la caséine. Parfois on ajoute du $\text{Ca}(\text{Cl})_2$ au lait pour aider la floculation en caillant le lait pour la fabrication de fromage.

[NaCl] mol/l	$1/\kappa$ (nm)
0,001	10
0,01	3
0,1	1
1	0,3

Tableau 5.2.2

Effet de la concentration de NaCl sur la valeur de $1/\kappa$

Tableau 5.2.3
Effet de la valeur de z sur la valeur de $1/\kappa$

Electrolyte	$1/\kappa$ (nm)
NaCl, 0,01 mol/l	3
Ca(Cl) ₂ , 0,01 mol/l	1,9
Al(Cl) ₃ , 0,01 mol/l	1,3

En outre, il existe une autre répulsion de type stérique, c'est-à-dire une répulsion due à la présence des polymères adsorbés sur les particules (cf. Figure 5.2.2). Les molécules forment un obstacle entre elles si la distance devient petite. On ne peut pas exprimer la répulsion stérique par une formule simple comme la répulsion électrostatique. La répulsion stérique dans les aliments est surtout importante si on a la stabilisation (des émulsions, des mousses) par les protéines.

Figure 5.2.2
Figure représentant la répulsion dite stérique entre particules (très schématique et pas à l'échelle!)

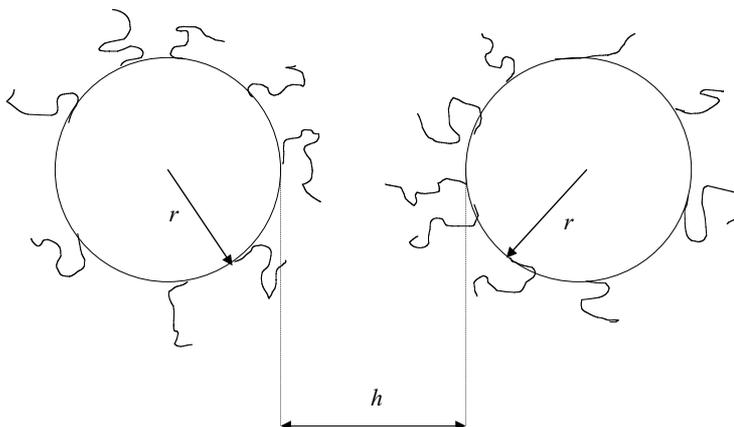
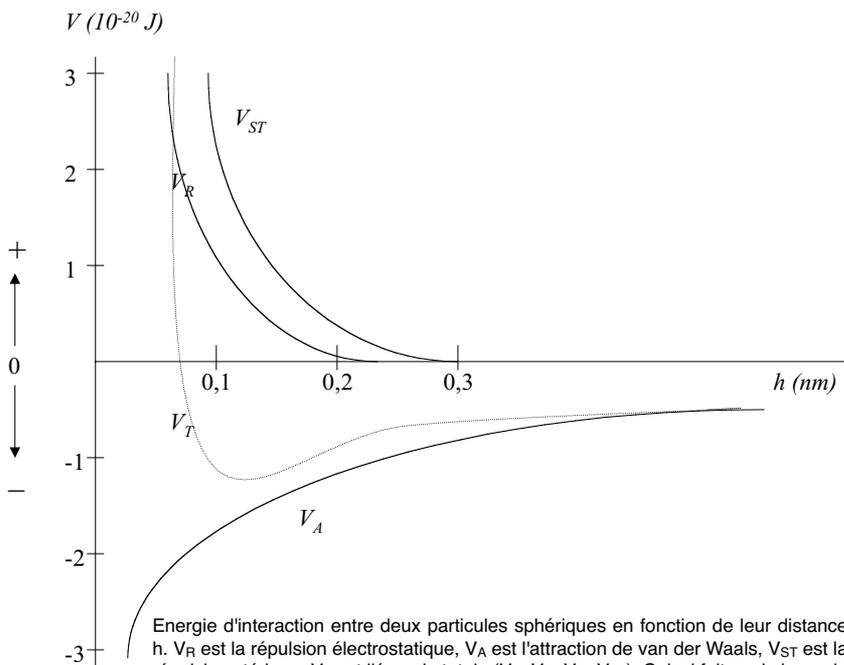


Figure 5.2.3



Energie d'interaction entre deux particules sphériques en fonction de leur distance h . V_R est la répulsion électrostatique, V_A est l'attraction de van der Waals, V_{ST} est la répulsion stérique, V_T est l'énergie totale ($V_T = V_A + V_R + V_{ST}$). Calcul fait sur la base de deux particules avec $r = 1\mu\text{m}$, $A = 10^{-20}$ J, $\psi_d = 50$ mV, mais résultats seulement approximatifs.

La combinaison de répulsion et d'attraction résulte en une énergie totale V_T (cf. Figure 5.2.3). Si V_T est positive la répulsion est dominante et les particules, et par conséquent les systèmes colloïdaux, sont stables ; si V_T est négative, l'attraction est dominante et les particules sont instables, c'est-à-dire le résultat est la floculation. La combinaison de l'attraction de van der Waals et de la répulsion électrostatique s'appelle la théorie DLVO (d'après Deryagin, Landau, Verwey et Overbeek qui ont développé cette théorie).

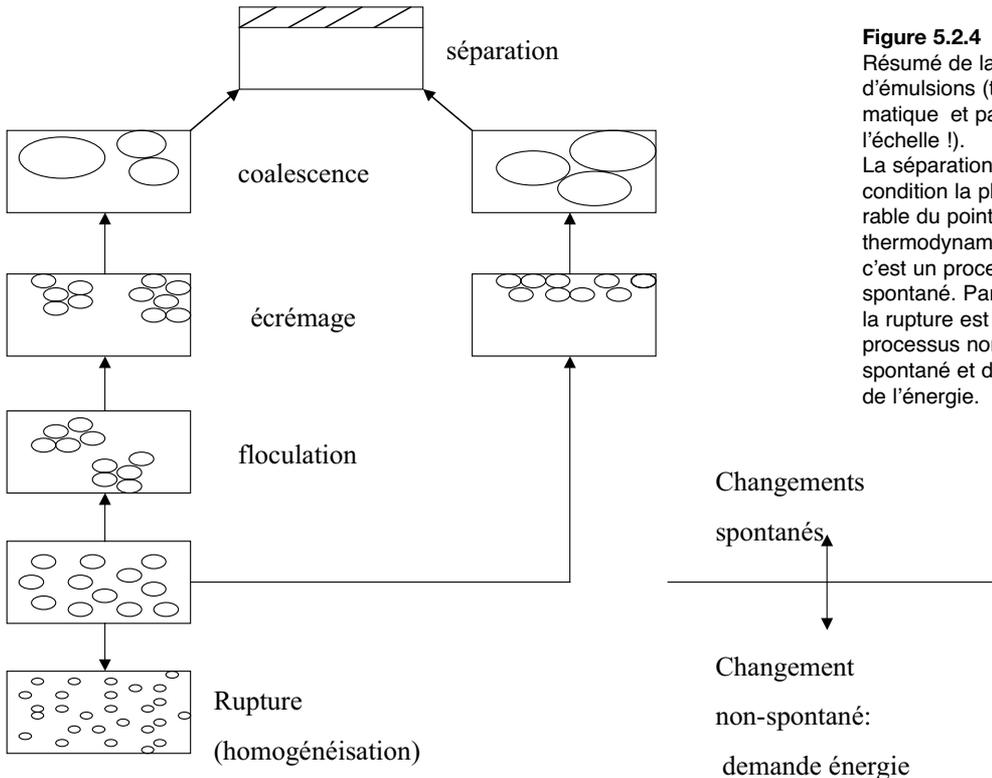


Figure 5.2.4

Résumé de la stabilité d'émulsions (très schématique et pas à l'échelle !). La séparation est la condition la plus favorable du point de vue thermodynamique et c'est un processus spontané. Par contre, la rupture est un processus non-spontané et demande de l'énergie.

Comme il est montré dans la figure 5.2.3, V_t peut être négative (aboutissant à l'attraction entre particules) à une certaine distance h , mais positive à une distance très petite. C'est-à-dire que dans ce cas les particules peuvent floculer dans certaines conditions, mais les particules ne peuvent pas s'approcher les une des autres. On appelle cela un minimum secondaire. Dans ce cas, la coalescence ou la fusion de particules est impossible.

La différence entre la floculation et la coalescence est comme suit. Dans le cas de la floculation, l'identité des particules est maintenue. Dans le cas de la coalescence, les particules fusionnent entre elles ; cela arrive souvent avec des globules d'émulsion (diamètre : $0,2 - 10 \mu\text{m}$) ou des bulles de mousse (diamètre : $\geq 100 \mu\text{m}$). Mais pour avoir la coalescence, il est d'abord nécessaire d'avoir la floculation. La figure 5.2.4 en donne un résumé.

La cinétique de floculation dépend des conditions d'écoulement. S'il n'y a pas d'écoulement, les particules peuvent se rencontrer seulement par le mouvement Brownien. Une équation pour le nombre de rencontres J_B (s^{-1}) dues au mouvement Brownien est :

$$(5.2.7) \quad J_B = \frac{4}{3} kT \frac{N^2}{\eta}$$

avec N le nombre de particules (m^{-3}), k la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$), T la température absolue (K) et η la viscosité (Ns m^{-2}). L'équation indique l'importance du nombre de particules et de la viscosité. Si la viscosité est augmentée, c'est plus difficile pour les particules de se rencontrer, et par conséquent d'avoir de la floculation.

S'il existe l'écoulement le nombre de rencontres est augmenté considérablement. Pour l'écoulement laminaire, l'équation permettant de calculer le nombre de rencontres J_G (s^{-1}) est :

$$(5.2.8) \quad J_G = \frac{2}{3} d^3 N^2 G_l$$

avec d le diamètre des particules (m) et G_l le gradient de vitesse d'écoulement laminaire (s^{-1}). L'équation indique que le diamètre des particules est très important dans ce cas (d^3), c'est-à-dire que les plus grandes particules floculent plus vite que les petites particules pour le même G_l . C'est d'autant plus remarquable que la viscosité n'est pas importante dans ce cas.

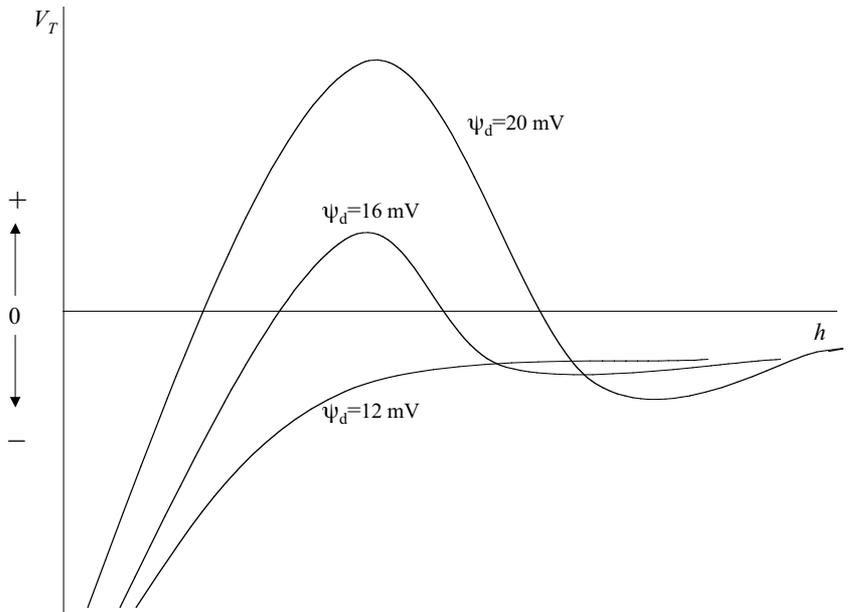


Figure 5.2.5
Exemple de l'effet de charge ψ_d sur l'énergie d'interaction V_T . Calculé pour deux globules avec $r=2 \mu\text{m}$ et $1/\kappa=3 \text{ nm}$ (pas de répulsion stérique) mais les résultats sont seulement approximatifs.

La stabilité des particules, donc des aliments, est fortement influencée par le pH et les électrolytes si on a une stabilisation dominée par la répulsion électrostatique. Le pH peut influencer la charge des particules (ψ_d dans l'équation 5.2.5), par exemple si on a des protéines adsorbées un pH élevé donne une charge négative, et un pH bas donne une charge positive. La Figure 5.2.5 donne un exemple de l'effet de la charge ψ_d ; si V_T est négative le résultat est la floculation.

L'effet des électrolytes est pareil mais leur influence est liée au paramètre κ , (cf. Figure 5.2.6 et tableaux 5.2.2 et 5.2.3).

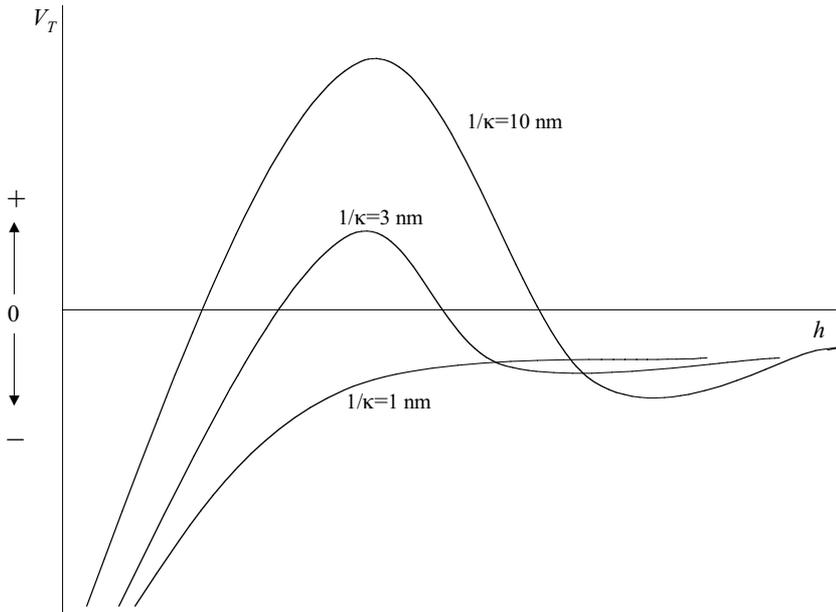


Figure 5.2.6

Exemple de l'effet (des électrolytes sur) $1/\kappa$ et l'énergie d'interaction V_T . Calculé pour deux globules avec $r=2 \mu\text{m}$, $\psi_d=16 \text{ mV}$ (pas de répulsion stérique) mais les résultats sont seulement approximatifs.

Un bon exemple est la stabilité du lait. Si on diminue le pH, la stabilité de la caséine (présente dans les particules dites micelles) est perdue, et on peut observer l'instabilité de la caséine dans le lait acidifié : le résultat est la floculation. Dans le cas du fromage on a aussi une floculation de la caséine (provoquée par la présure) et les globules gras sont enfermés dans le caillé . Mais les globules gras sont seulement floculés, ils ne sont pas fusionnés : ils se trouvent dans un minimum secondaire.

5.2.4 Agents tensio-actifs/émulsifiants/stabilisants

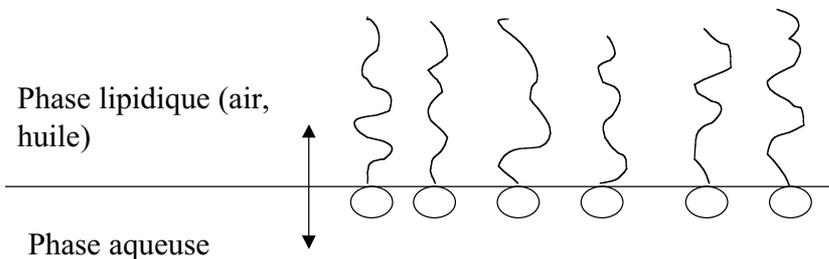
Dans le cas d'une émulsion, ou bien d'une mousse, il est nécessaire d'avoir des agents tensio-actifs. Pourquoi? C'est dû à l'instabilité thermodynamique à cause d'interface de grande étendue : il y a une tendance spontanée à diminuer l'étendue des interfaces et cela est réalisé par floculation et coalescence. C'est pourquoi on a besoin des agents tensio-actifs, aussi bien pour la formation que pour la stabilité. Premièrement, ils sont effectifs parce qu'ils

abaissent la tension superficielle/interfaciale et ce phénomène facilite la formation d'émulsions et de mousse.

En général, les agents tensio-actifs sont caractérisés par :

- une structure amphipolaire éventuellement chargée,
- l'adsorption sur l'interface/surface, les deux extrémités de leurs molécules présentant des affinités l'une pour la phase aqueuse et l'autre pour la phase lipidique (cf. Figure 5.2.7) ,
- la réduction de la tension interfaciale/superficielle,
- la possibilité d'émulsification,
- la protection des particules contre la floculation et la coalescence (stabilisation).

Figure 5.2.7
Représentation schématique de l'adsorption des agents tensio-actifs.



Il existe beaucoup d'agents tensio-actifs naturels et artificiels. Le tableau 5.2.4 en donne quelques exemples.

Parfois, on caractérise les agents tensio-actifs par l'indice HLB, c'est-à-dire la balance "hydrophile-lipophile". Les systèmes colloïdaux hydrophiles ont un indice HLB élevé : ils donnent des émulsions H/E, les systèmes colloïdaux lipophiles ont un indice HLB bas : cas des émulsions E/H. Quelques exemples sont :

HLB lécithine : ~ 30 , HLB glycérylmonostéarate : 3,8 , HLB sodium oléate : 18.

Tableau 5.2.4
Quelques exemples d'agents tensio-actifs

	Naturels	Artificiels
Ioniques	Protéines, phospholipides	Savons, sulfates d'aryle (sulfonates)
Non-ioniques	Monoglycérides	Monoesters de propylène glycol, esters de sorbitol

Les agents tensio-actifs ont aussi leur influence sur l'interaction colloïdale parce qu'ils sont adsorbés sur l'interface des particules et peuvent contribuer à l'interaction électrostatique et stérique (cf. Figure 5.2.2), dépendant de leur structure moléculaire.

Les facteurs influant sur l'interaction des particules sont résumés dans le tableau 5.2.5. En outre, on a l'influence de la viscosité qui détermine le nombre de rencontres entre particules (cf. équation 5.2.7). Si la viscosité est très élevée, c'est plus difficile pour les particules de se rencontrer du fait du mouvement Brownien.

Facteur		Attraction van der Waals	Répulsion électrostatique	Répulsion stérique
propriétés de particules	rayon r	+	+	(+)
	matériel	+	-	-
	couche adsorbée	(+)	+	+
propriétés de phase dispersante	pH	-	+	-
	électrolytes	-	+	-

Tableau 5.2.5

Sommaire des facteurs importants pour la stabilité colloïdale

5.2.5 Les gels

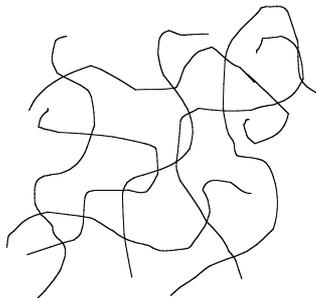
Les gels sont obtenus par la formation d'un réseau de particules ou de polymères à travers la phase dispersante. Si les flocons sédimentent on obtient alors un précipité. Dans certains cas il est nécessaire d'avoir un précipité (par exemple si on veut extraire la caséine du lait par précipitation); dans d'autres cas, il faut éviter la formation d'un précipité et, par contre, stimuler la formation d'un gel (par exemple dans le cas du yaourt ou du caillé). Il n'existe pas une grande différence entre la formation d'un gel et celle d'un précipité; c'est seulement une question de cinétique. On peut dire qu'un gel est un réseau de particules qui ne peuvent pas précipiter à cause du réseau qui est formé. La formation d'un gel est plus probable lorsque :

- la floculation est plus rapide,
- le fluide ne s'écoule pas,
- la différence de densité est faible,
- le nombre de particules est élevé.

Lorsqu'un réarrangement des particules dans un gel est possible, le nombre de liaisons augmente, le réseau se contracte et la phase dispersante est expulsée conduisant au phénomène de synérèse (perte de qualité physique).

En effet, il existe deux types de gels (Figure 5.2.8) :

- gels de macromolécules, comme la pectine ou la gélatine
- gels de particules, comme le yaourt (particules de caséine), la margarine et le beurre (particules de cristaux gras)



Gels de polymères



Gels de particules

Figure 5.2.8

Représentation de gels de particules et gels de polymères (très schématique et pas à l'échelle !).

La différence entre les deux est le type d'interaction. Dans le cas des gels de macromolécules on a un réseau de macromolécules, dans le cas de gels de particules on a une attraction entre les particules. Il existe aussi des mélanges des deux types, comme les gels d'amidon : les deux types de macromolécules (amylose et amylopectine) forment des gels de macromolécules, et les grains d'amidon forment des gels de particules.

Les amidons à l'état natif sont des sphérocristaux présents dans les tissus végétaux sous forme de granules intracellulaires denses, d'aspect et de structure souvent caractéristiques de la plante d'où ils proviennent. Ils sont pratiquement insolubles dans l'eau froide.

Lorsque les amidons sont exposés à la fois à la chaleur ($\sim 60^\circ\text{C}$) et à l'humidité, il y a la gélatinisation. Les granules gonflent du fait d'une adsorption d'eau sur les groupements polaires (hydroxyles), une adsorption qui entraîne une augmentation de leur volume (20 – 30 fois) ; la viscosité est aussi augmentée conduisant à un effet d'agents épaississants. Elle permet d'ailleurs aussi une augmentation de la digestibilité.

Pendant le stockage de l'amidon gélatinisé, il se produit le phénomène de rétrogradation (recristallisation d'amidon). Ces phénomènes sont en partie expliqués par des modifications physico-chimiques intervenant au niveau des constituants de l'amidon. En effet, après un certain temps les molécules vont s'agréger de nouveau et entraîner la rétrogradation et par voie de conséquence la perte de la qualité de l'aliment. Un exemple de ce phénomène est le rassissement du pain.

5.2.6 Agents stabilisants/épaississants/gélifiants

Comme nous l'avons vu, il existe la possibilité d'avoir la floculation et éventuellement la séparation des phases. Si on veut éviter cette séparation, on peut utiliser des agents stabilisants. Ces agents sont utilisés surtout pour augmenter la viscosité des solutions (cf. équation 5.2.7), des suspensions et des émulsions et des mousses dont la phase dispersante est aqueuse ; ils agissent en tant qu'épaississants. L'augmentation de la viscosité peut conférer une texture particulière, stabiliser la phase dispersée, empêcher ou réduire la formation de cristaux de sucre ou de glace en ralentissant la diffusion des molécules.

Les principaux agents stabilisants sont les colloïdes hydrophiles suivants : amidons naturels et modifiés, cellulose modifiée, pectines, gélatines, caséine, gommés.

5.2.7 Rhéologie

La rhéologie est la science des phénomènes de déformation et d'écoulement de solides et de fluides sous l'influence de forces mécaniques en fonction du temps. Ces phénomènes déterminent souvent les propriétés fonctionnelles des aliments et interviennent

pendant les traitements (comportement mécanique), pendant l'entreposage (stabilité physique) et au moment de la consommation (texture).

Les propriétés mécaniques déterminées par la rhéologie sont :

- l'écoulement des fluides,
- la résistance aux déformations des solides,
- la rupture/fracture (de liaisons interatomiques).

Ces propriétés sont déterminées par la structure du produit.

Il existe deux types de comportement rhéologique idéal : solide élastique, fluide visqueux.

Les paramètres importants pour la rhéologie sont la force F (N), la contrainte $\sigma = F/O$ ($N\ m^{-2}$) O = surface sur laquelle F agit, et la déformation relative $\Delta H/H$ (H = longueur en m).

Lorsqu'une force, provoquant une déformation ou un glissement sans changement de volume, est appliquée à un corps solide, on observe que la déformation relative est proportionnelle à l'effort appliqué.

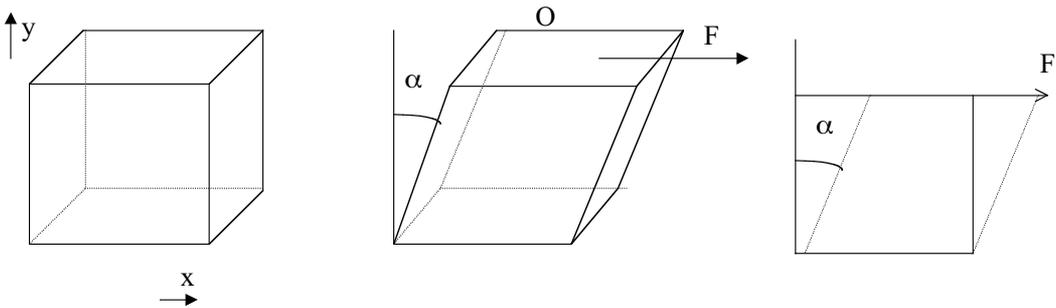
La contrainte de cisaillement (en Anglais : shear stress) est définie comme

$$\sigma = \frac{F}{O}$$

la déformation relative comme

$$\frac{dx}{y} = \text{tg}\alpha = \gamma \text{ (en Anglais : shear strain) (cf. Figure 5.2.9).}$$

Figure 5.2.9
Représentation du cisaillement



Pour un solide élastique idéal on obtient la loi de Hooke :

$$\sigma = G \frac{dx}{y} = G \cdot \gamma$$

(5.2.9)

La constante de proportionnalité G s'appelle le module (en Anglais : modulus) de rigidité ($N\ m^{-2}$). Dans le cas d'un solide élastique idéal, l'élasticité est immédiate et totale (comme un ressort ou un caoutchouc), et la déformation est réversible (cf. Figure 5.2.10).

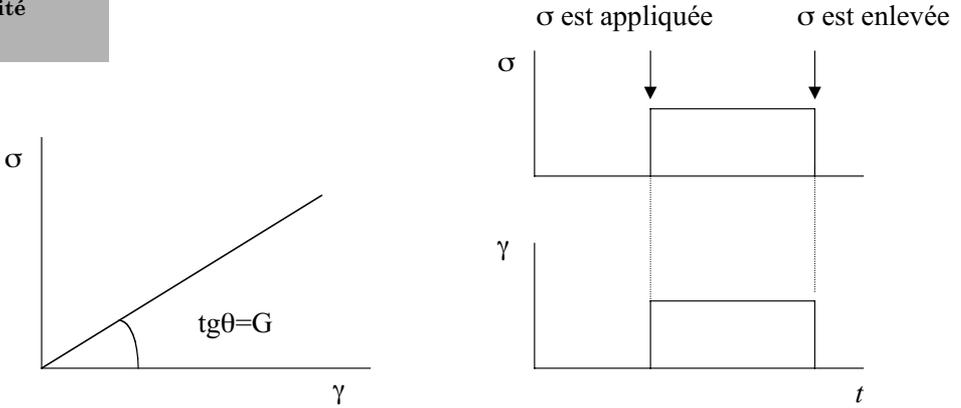
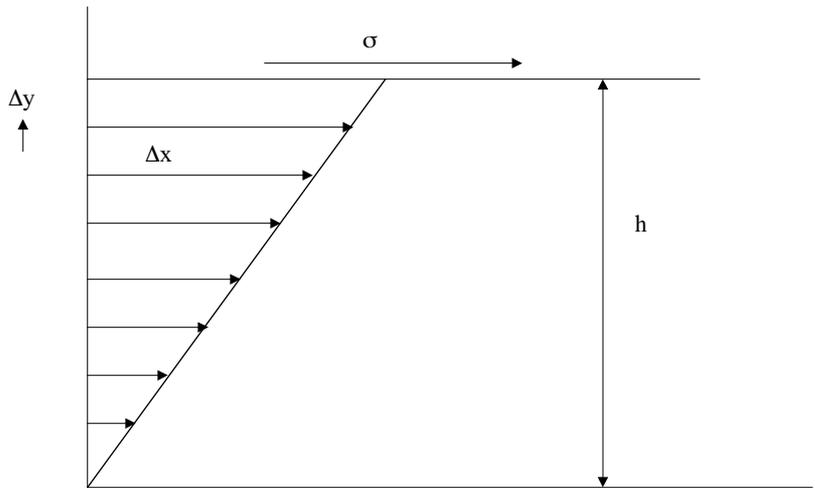


Figure 5.2.10
Représentation du comportement d'un solide élastique idéal

Le liquide newtonien est le modèle idéal du fluide visqueux. La viscosité est la résistance frictionnelle qu'un fluide en mouvement oppose à une force de cisaillement. Lorsqu'un fluide s'écoule de façon laminaire, c'est-à-dire sans tourbillons, le long d'une paroi plane immobile, on admet que la couche liquide immédiatement au contact de la paroi reste immobile, et que chaque couche successive se déplace à une vitesse qui augmente avec la distance qui la sépare de la paroi (cf. Figure 5.2.11).

Figure 5.2.11
Représentation d'écoulement laminaire



On peut définir (cf. Figure 5.2.11) une vitesse d'écoulement

$$v = \frac{dx}{dt} \text{ (m s}^{-1}\text{), un gradient de vitesse } \frac{V}{h} \text{ (s}^{-1}\text{),}$$

une déformation relative

$$\gamma = \frac{dx}{y} \text{ (qui n'est pas constante !)} \text{ et } \frac{d\gamma}{dt} = \frac{V}{h}$$

La loi de Newton dit que :

$$\sigma = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (5.2.10)$$

et la constante de proportionnalité η s'appelle la viscosité (Ns m^{-2}) ($1 \text{ Ns m}^{-2} = 10 \text{ Poises}$) : cf. Figure 5.2.12. (Nous avons déjà utilisé la notion de viscosité; voilà la définition).

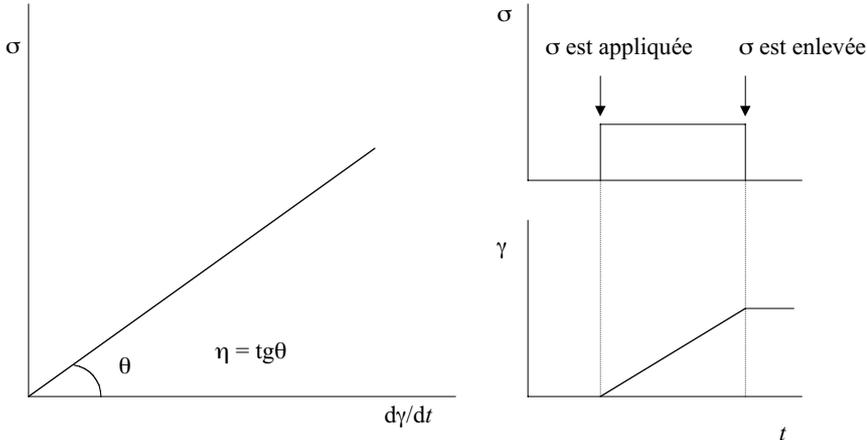


Figure 5.2.12
Représentation de la loi de Newton

Après que la contrainte de cisaillement est enlevée, la déformation est irréversible, c'est-à-dire permanente : le système ne retourne pas à la condition initiale.

Quelques exemples d'aliments newtoniens et élastiques sont donnés au tableau 5.2.6.

Aliments newtoniens :	Aliments élastiques :
eau	gélatine (si $\gamma < 100 - 200 \%$)
bière	gels du lait (si $\gamma < 3$)
solution de saccharose	margarine (si $\gamma < 0,05$)
huiles	
lait cru ou pasteurisé	

Tableau 5.2.6
Quelques exemples de classification rhéologique des aliments. γ est la déformation relative.

Traction et compression sont encore d'autres formes de déformation qui sont importantes pour les aliments pendant la transformation mais aussi pendant la mastication, cf. Figure 5.2.13.

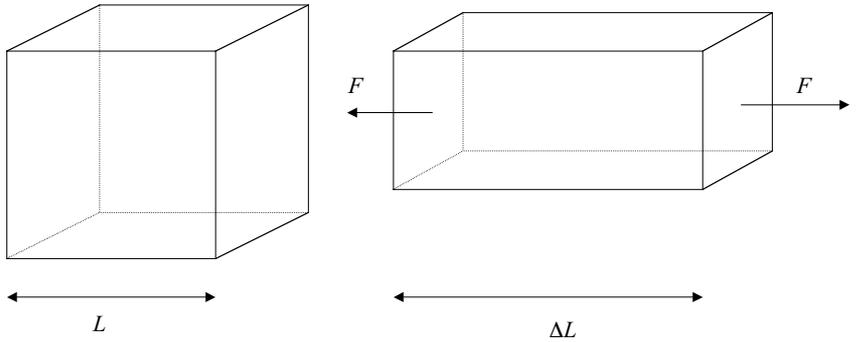
On a encore la contrainte $\sigma = \frac{F}{O}$, et la déformation relative

$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L}$. Pour un solide élastique idéal la relation est :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_t \quad (5.2.11)$$

et la constante de proportionnalité E s'appelle le module de Young

Figure 5.2.13
Représentation de
la traction et
de la compression



(N m^{-2}). Pour un fluide visqueux idéal la relation est (comparée à l'équation 5.2.10) :

$$(5.2.12) \quad \sigma = \eta_E \frac{d\varepsilon_t}{dt}$$

et η_E est la viscosité de traction. Pour les liquides Newtoniens on trouve que $\eta_E = 3 \times \eta$, (pour les solides élastiques idéaux que $E = 3 \times G$, cf. les équations 5.2.9 et 5.2.11).

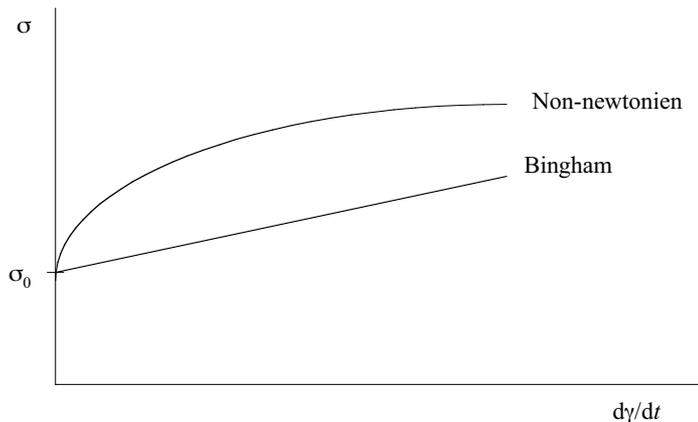
Malheureusement, le comportement rhéologique de la plupart des aliments n'est pas idéal et il faut considérer le comportement non-idéal. Généralement les aliments ne sont ni seulement visqueux, ni seulement élastiques, mais plutôt viscoélastiques. Le rapport entre les comportements visqueux et élastiques dépend de la vitesse de déformation dy/dt . Il existe des fluides non-newtoniens, c'est-à-dire il n'y a pas de proportionnalité entre la vitesse relative d'écoulement (ou de déformation) dy/dt et la contrainte de cisaillement σ .

On peut classer les aliments selon leur comportement non-idéal comme suit :

a) Corps plastiques ou corps de Bingham.

Ces corps ne coulent pas sous l'effet de leur poids ; il faut que la contrainte dépasse un seuil σ_0 pour que l'écoulement commence

Figure 5.2.14
Représentation des
corps plastiques



(cf. Figure 5.2.14). $\sigma < \sigma_0$: élasticité, $\sigma > \sigma_0$: écoulement (newtonien ou non newtonien). Pour $\sigma > \sigma_0$ le résultat est une destruction de la structure. L'existence de σ_0 permet aux particules (exemple de jus de fruits) de ne pas sédimenter.

Pour les corps plastiques non-newtoniens l'équation est :

$$\sigma - \sigma_0 = \eta^* \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (5.2.13)$$

avec η^* : la viscosité apparente ; pour les corps de Bingham (comportement Newtonien) :

$$\sigma - \sigma_0 = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (5.2.14)$$

Quelques exemples de ce comportement rhéologique sont : la pâte, la margarine, le ketchup, la crème fouettée, la marmelade de pommes, le chocolat, la moutarde.

b) Le comportement pseudoplastique/dilatant

Les fluides de ce type ne présentent pas un seuil σ_0 pour que l'écoulement puisse avoir lieu, mais la viscosité dite ici apparente (η^*) change lorsque la vitesse relative d'écoulement augmente (cf. Figure 5.2.15)

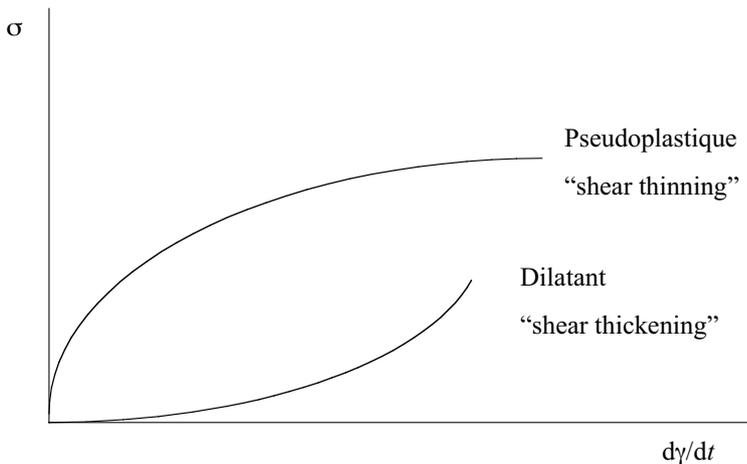


Figure 5.2.15
Représentation du
comportement
pseudoplastique/dilatant

L'équation pour ce comportement est :

$$\sigma = \eta^* \cdot \frac{d\gamma}{dt} \text{ et } \eta^* = f\left(\frac{d\gamma}{dt}\right) \quad (5.2.15)$$

Si η^* diminue avec $d\gamma/dt$ le comportement rhéologique s'appelle pseudoplastique (en Anglais : shear thinning), si η^* augmente avec $d\gamma/dt$ on appelle cela dilatant (en Anglais : shear thickening). Quelques exemples de corps pseudoplastiques sont les solutions de polymères, le lait concentré, le jus de fruits, le caillé. Un exemple de corps dilatant est la pâte d'arachide.

c) Le comportement élastique non-linéaire

Le comportement des corps de ce type est illustré par la figure 5.2.16. et représenté par la relation (comparer à l'équation 5.2.9) :

$$(5.2.16) \quad \sigma = G^* \cdot \gamma \quad G^* = f(\gamma)$$

G^* est le module apparent.

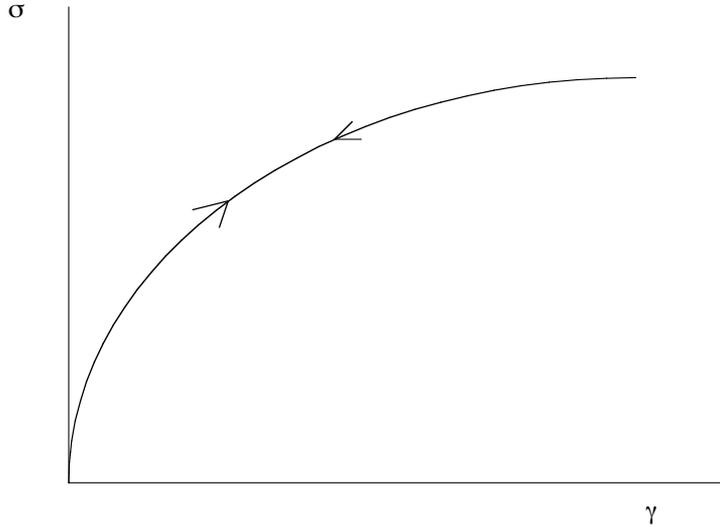


Figure 5.2.16
Représentation du
comportement élas-
tique non-linéaire

Quelques exemples sont la gélatine, l'œuf cuit avec une grande déformation. La caractéristique de ce type de comportement est la réversibilité : le recouvrement est total si la contrainte est levée.

d) Le comportement plastique.

Le comportement des corps de ce type est illustré par la figure 5.2.17. La déformation est (partiellement) permanente et non réversible. Deux exemples de ce type sont le fromage et la pâte.

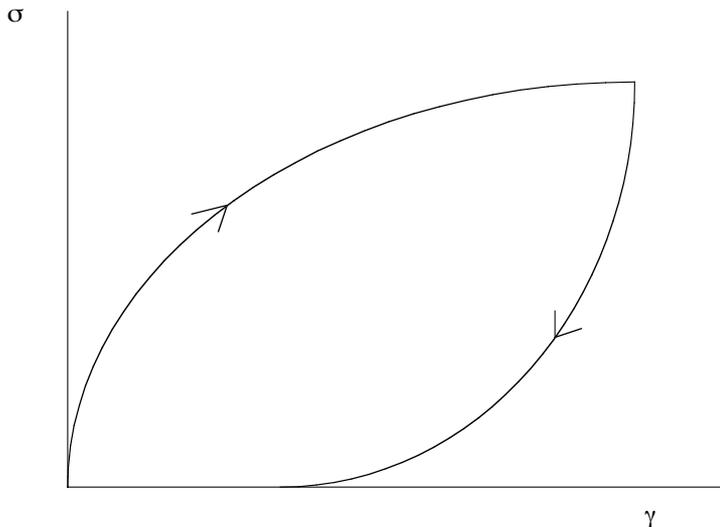


Figure 5.2.17
Représentation du
comportement
plastique

e) Le comportement thixotropique.

Pour les fluides étudiés jusqu'à présent, la relation entre la contrainte de cisaillement et la vitesse relative d'écoulement (ou de déformation) n'était pas sous l'influence directe du temps, les équilibres étant atteints instantanément.

Dans le cas de nombreux aliments il n'en est cependant pas ainsi, et la contrainte nécessaire pour provoquer une vitesse relative d'écoulement déterminée et constante peut varier considérablement en fonction du temps. Il existe un hystérésis accompagnant la déformation thixotropique. La figure 5.2.18 donne deux exemples.

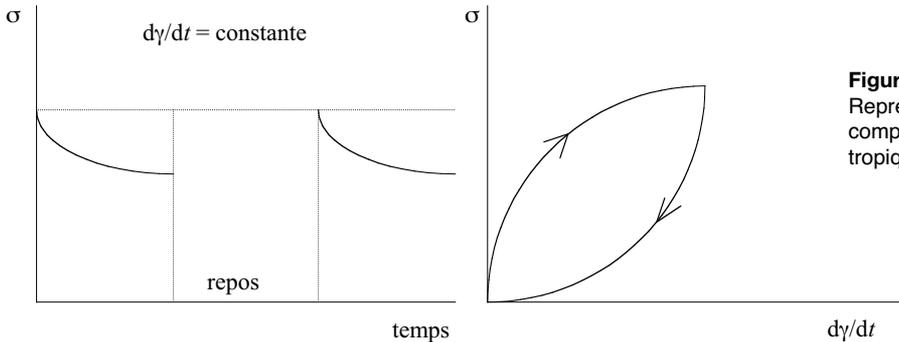


Figure 5.2.18
Représentation du
comportement thixo-
tropique

Quelques exemples sont les aliments comme les gels, le ketchup, le miel, les potages concentrés.

Enfin et dans le domaine de la rhéologie, on parle également de la fracture et de la rupture des aliments. La notion de fracture/rupture est importante parce que les aliments doivent rompre pendant la mastication ; par contre ils doivent rester intacts pendant le transport et le stockage. La différence entre la résistance à la rupture et la cassure à temps peut être très subtile. Deux conditions sont indispensables à la réalisation de la fracture et de la rupture :

- la contrainte de cisaillement doit être assez grande pour qu'il y ait rupture des liaisons,
- le temps d'application doit être assez long pour que les liaisons puissent rompre.

Il y a une déformation maximale avant que la rupture ait lieu. Pour la plupart des aliments elle est obtenue à moins de 1 % de déformation mais cela dépend du matériel. Quelques exemples sont donnés au tableau 5.2.7.

Matière	Déformation maximale (%)	E (N.m ⁻²)
caoutchouc	300	6×10^5
gélatine	100 – 200	?
gel d'alginate	20	$10^3 - 10^5$
gel de lait acidifié	3	300
margarine	0,05	$10^4 - 10^5$
fer	0,05	2×10^{11}

Tableau 5.2.7

Exemples de matières pour lesquelles la déformation est possible avant que la rupture arrive et le module de Young E

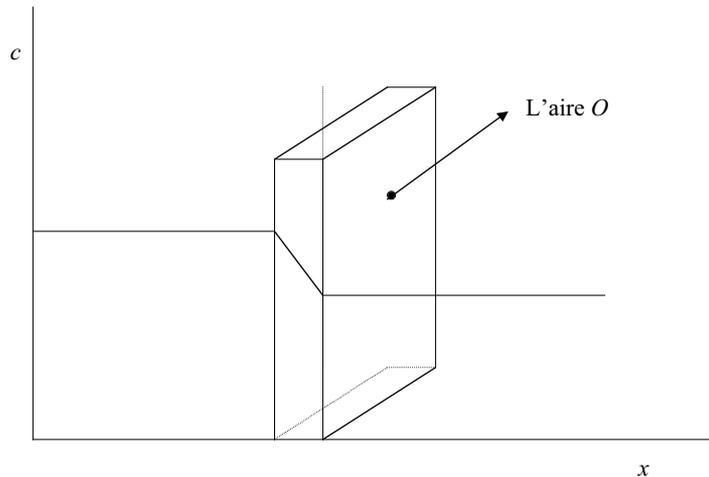
Si la déformation est rapide, le matériel n'a pas le temps de rompre et est dans ce cas élastique. Mais si la déformation est lente, la rupture a lieu. Le facteur 'temps' est donc encore important.

5.2.8 La diffusion et la perte de la qualité

La diffusion est due au mouvement Brownien des molécules. Le phénomène de diffusion est important pour la transformation et la qualité des aliments :

- elle détermine le transport de matériaux et de chaleur si l'aliment est solide (pas d'écoulement)
- elle détermine la vitesse de séchage, d'extraction, de salage, de la conservation par le sucre (les produits confits)
- elle détermine la perte de composants (par exemple l'eau) pendant l'entreposage
- elle détermine l'absorption de composants d'emballage dans les aliments
- elle détermine la distribution des arômes composant le goût, des colorants.

Figure 5.2.19
Représentation de
la diffusion



La diffusion est un processus lent qui s'applique au niveau des molécules migrant (au contraire, la convection est un processus rapide dans lequel la molécule est entraînée dans un courant de fluide). La diffusion en terme mathématique est décrite comme une variation de masse m ou de concentration c par temps et par surface (cf. Figure 5.2.19) Elle est donnée par la première loi de Fick :

$$(5.2.17) \quad \frac{dm}{dt} = -D_f \cdot O \cdot \frac{dc}{dx}$$

dans laquelle le symbole D_f représente la diffusivité de la molécule ($m^2 s^{-1}$), m la masse (kg), t le temps (s), O l'aire (m^2), c la concentration ($mol kg^{-1}$), x la distance.

Pour des particules sphériques (molécules inclus) Einstein a trouvé que

$$D_f = \frac{kT}{6\pi\eta r}$$

k est la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

T la température absolue (K)

η la viscosité (N s m^{-2})

r le rayon (m).

(5.2.18)

Quelques exemples de diffusivité sont donnés dans le tableau 5.2.8, et il est évident que la diffusivité est déterminée par la taille des molécules/particules.

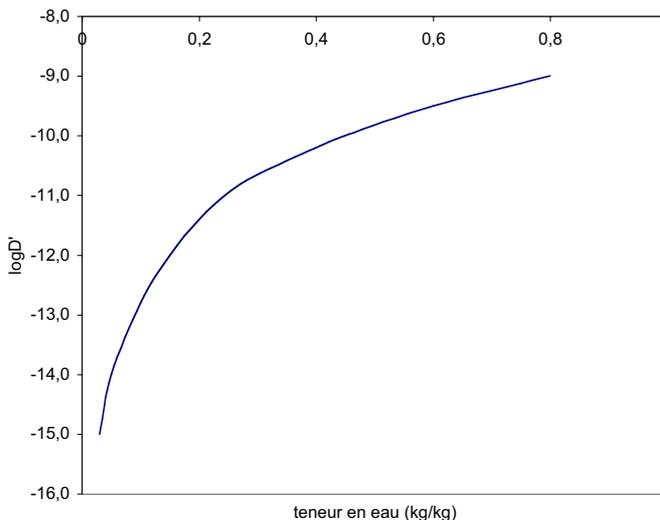
	D (m^2s^{-1})
H ₂	$5,1 \times 10^{-9}$
NaCl	1×10^{-9}
Saccharose	$5,2 \times 10^{-10}$
Amidon soluble	1×10^{-10}
particule de caséine (50 nm)	4×10^{-12}
particule de caséine (200 nm)	1×10^{-12}

Tableau 5.2.8

Diffusivité (D) de quelques molécules dans l'eau à 20 °C

L'effet de la température sur la diffusion est donné par l'équation d'Einstein (5.2.18), mais on a aussi un effet de la température sur la viscosité.

La diffusivité est influencée par la présence d'autres molécules, par exemple la présence de sucres en solution réduit sensiblement la diffusivité des arômes. Dans la plupart des aliments le comportement diffusionnel des molécules est perturbé par beaucoup de phénomènes, et pour cela on parle de diffusivité apparente D' . La figure 5.2.20 donne un exemple de diffusivité de l'eau dans les aliments déshydratés.

**Figure 5.2.20**

Diffusivité apparente (D') de l'eau en fonction de la teneur en eau.

Pour la diffusion des molécules, par exemple d'un liquide dans un aliment, on peut calculer le temps nécessaire aux molécules dans l'aliment pour arriver à une certaine position

$$(5.2.19) \quad x_{0,5} = \sqrt{D_f \cdot t_{0,5}}$$

ou

$$(5.2.20) \quad x_{0,5}^2 = D_f \cdot t_{0,5}$$

Le paramètre $x_{0,5}$ indique la valeur x pour laquelle la concentration c est $0,5 \times c_0$. La figure 5.2.21 et le tableau 5.2.9 donnent une représentation de ce phénomène.

Figure 5.2.21
Changement de concentration c d'un composé migrant d'un liquide dans un aliment en fonction du temps ($t_1 < t_2 < t_3$) et de la position x .

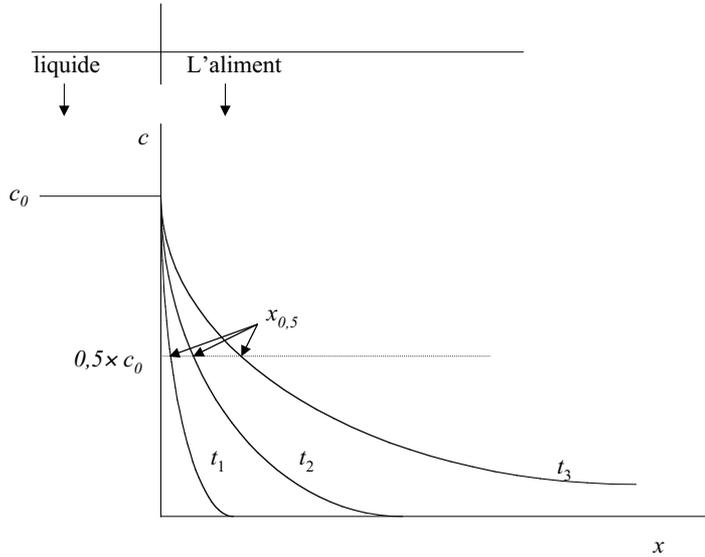


Tableau 5.2.9
Quelques exemples de valeurs $x_{0,5}$ en fonction de la valeur D'

$t_{0,5}$	$D'=10^{-9}$	$D'=10^{-10}$	$D'=10^{-15}$
1 s	0,03 mm	0,01 mm	0,03 μm
1 mn	0,25 mm	0,08 mm	0,25 μm
1 h	2 mm	0,6 mm	2 μm
1 jour	9 mm	3 mm	9 μm
1 an	200 mm	56 mm	200 μm

5.2.9 Conclusion

Pour conclure le chapitre sur la qualité physique, nous donnons dans le tableau 5.2.10 un résumé des phénomènes de perte de la qualité du point de vue physique.

phénomène	cause	exemple
synérèse	contraction de gel	yaourt, confiture
rétrogradation	recristallisation d'amidon	rassis du pain
floculation	agrégation de molécules ou particules	produits laitiers
coalescence	agrégation des globules gras	produits laitiers, sauces, crèmes
écrémage/ sédimentation	pesanteur	produits laitiers, jus de fruits
crystallisation	supersaturation	lactose dans lait en poudre, dans glace, aliments dans état vitreux
perte de goût et arôme	diffusion	des aliments conditionnés

Tableau 5.2.10
Résumé de phénomènes physiques en relation avec la qualité

5.3 La qualité organoleptique

Les perceptions gustatives et olfactives sont l'aboutissement de processus psychophysiologiques très complexes et largement inexpliqués. Elles sont influencées par les autres perceptions sensorielles (vision, toucher), par la température, par des stimulations chimiques non spécifiques, et par diverses motivations psychosociologiques en partie responsables du caractère agréable ou désagréable des perceptions.

La saveur et l'arôme des aliments résultent de la stimulation simultanée de récepteurs situés dans la bouche et dans la cavité nasale, par un très grand nombre de constituants des aliments.

La nature et la structure de ces constituants, les quantités présentes dans les aliments, l'intensité et la nature des perceptions sensorielles qu'ils provoquent, seuls ou en association, font l'objet de nombreuses recherches dont le but final est l'amélioration de la flaveur des aliments. Cette amélioration peut être obtenue principalement par quatre voies :

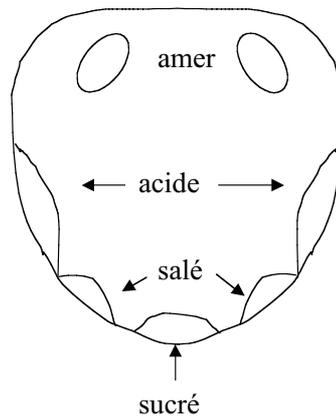
- le choix et la sélection des matières premières ;
- le choix des procédés technologiques de transformation ;
- l'addition aux aliments de substances aromatisantes naturelles ou synthétiques ;
- la formation, au sein même des aliments, de quantités accrues de molécules aromatisantes.

5.3.1 Saveur/goût

Les récepteurs du goût sont surtout localisés dans les bourgeons des papilles gustatives de la langue ; chaque bourgeon est constitué de plusieurs cellules et s'ouvre par un pore à la surface de la langue ; il est innervé par un nerf sensible non seulement aux saveurs mais aussi à d'autres stimuli comme la température, la pression, la rugosité d'une surface. Aucun bourgeon n'est spéci-

fique d'une seule saveur, mais répond généralement à plusieurs saveurs avec une prédominance pour l'une d'entre elles. Il existe quatre saveurs dites de base : amère, acide, salée et sucrée, toutes hydrosolubles ; car pour pénétrer dans les pores des bourgeons gustatifs, elles doivent être dissoutes dans les jus alimentaires ou dans la salive. La localisation des récepteurs est indiquée sur la figure 5.3.1 ; la surface du milieu de la langue n'est pas sensible.

Figure 5.3.1
Localisation des récepteurs du goût de la langue



La fixation d'une substance douée de sapidité sur un bourgeon gustatif entraîne une impulsion électrique dans le nerf sensoriel. L'amplitude de cette impulsion et l'intensité de la saveur évaluée subjectivement répondent toutes les deux à la loi physiologique des stimulations ou loi de Fechner :

$$S = k_s \cdot \log(\text{concentration})$$

Avec S = stimulation

k_s = constante de proportion

Mais il existe un seuil de perception ; car les récepteurs gustatifs tout comme les récepteurs olfactifs, ne répondent que lorsque l'intensité du stimulus dépasse un certain seuil. Ce seuil correspond approximativement aux concentrations suivantes pour des solutions aqueuses de substances de référence des saveurs de base :

salée, NaCl : 0,25 %

sucrée, saccharose : 0,5 %

acide, HCl : 0,007 %

amère, quinine : 0,00005 %

Mais il existe une très grande différence de perception entre les individus.

Il n'est pas possible de mélanger les quatre saveurs pour obtenir des goûts nouveaux. Cependant deux phénomènes sont généralement observés :

Le phénomène d'adaptation : le maintien prolongé dans la bouche d'une substance dotée d'une certaine saveur conduit à la diminution de la sensibilité à cette même saveur ;

Les phénomènes de compensation/masquage : lorsque des saveurs sont mélangées.

La perception de goût est déterminée par :

- La qualité du goût : pouvant conduire au phénomène d'adaptation,
- L'intensité pouvant être évaluée par la loi de Fechner,
- Le charme, l'attrait,
- L'odeur (l'odeur contribue aussi un peu au goût)

5.3.2 Arôme/odeur

Les récepteurs olfactifs sont localisés dans la partie supérieure de la cavité rétro-nasale. Il n'y a pas de récepteur olfactif spécifique pour une odeur donnée.

Lors de la prise d'aliments, les substances volatiles libérées dans la bouche parviennent à la muqueuse olfactive en passant par la cavité buccale.

Il existe environ 17 000 substances olfactives différentes et environ 150 autres que personne ne peut distinguer. Il y a environ 100 mots disponibles pour désigner les différentes substances olfactives. C'est-à-dire qu'il est très difficile de décrire les saveurs dans les aliments. Cela signale un des problèmes qui sont associés à la recherche organoleptique.

Il y a des interactions entre les odeurs (neutralisation, renforcement, nouvelles odeurs) et les diverses combinaisons possibles expliqueraient la multitude d'odeurs différentes. Généralement les odeurs complexes sont préférées par rapport aux odeurs simples. En outre, il faut réaliser que la préférence pour un goût est aussi déterminée par la culture.

Tout comme avec le goût, des phénomènes d'adaptation et de perception sont aussi observés avec les odeurs.

Quelques exemples de molécules odorantes (volatiles) sont les esters (fruits), les aldéhydes (tomates), les amines (poisson), les mercaptans (café), les pyrazines (des aliments cuits), les lactones (pêche, lait chauffé).

5.3.3 Les agents aromatisants

On peut dire que l'acceptation des aliments par le consommateur est surtout déterminée par le goût et l'arôme. C'est pourquoi on utilise parfois des agents aromatisants dans l'industrie alimentaire. Ces agents sont employés pour donner, renforcer ou modifier un arôme, ou encore pour masquer un arôme indésirable. On utilise pour cela :

- Des épices et des herbes aromatiques, soit en poudre, soit sous forme d'oléorésine.
- Des huiles essentielles, qui présentent l'avantage d'être assez concentrées et d'avoir cependant un arôme analogue à celui de la plante d'origine ; mais elles sont sujettes à l'oxydation et cela peut poser un problème.

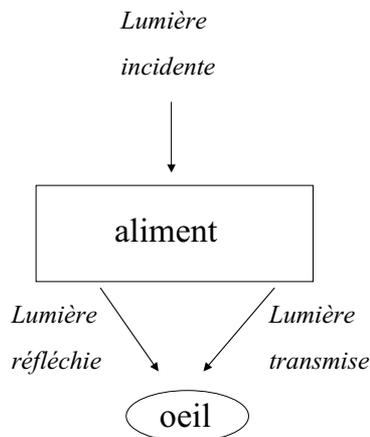
- Des extraits de fruits (framboise, cerise, fraise, pêche) obtenus par extraction avec un mélange éthanol-eau. Ces extraits sont très peu concentrés en substances aromatisantes; des extraits de vanille, obtenus de la même manière, ont de bonnes propriétés masquantes.
- Des arômes encapsulés obtenus par séchage par atomisation d'une émulsion ou suspension de substance aromatisante et de gomme ou de maltodextrines. Les films protecteurs de gomme prolongent la durée de conservation des substances sensibles à l'oxydation.
- Des substances aromatisantes synthétiques, que l'on emploie surtout sous forme de mélange, pour renforcer des arômes naturels. Ces substances présentent l'avantage d'être très économiques.

5.3.4 La couleur

La couleur joue un rôle important dans l'évaluation de la qualité d'un aliment. C'est une des premières impressions d'un aliment. En effet la couleur est souvent liée à la maturité, à la présence d'impuretés, à la mise en œuvre appropriée ou défectueuse d'un traitement technologique, à de mauvaises conditions d'entreposage, à un début de détérioration par les micro-organismes, etc.

Nous observons la couleur d'un objet comme un effet d'un stimulus sur la rétine, effet transmis par le nerf optique au cerveau, et intégré par ce dernier. Alors, cela n'est pas une propriété de l'objet, ni une lumière. Le stimulus est causé par une lumière réfléchie et/ou transmise par l'objet à partir d'une lumière incidente (cf. Figure 5.3.2).

Figure 5.3.2
Schéma de la
lumière réfléchie et
transmise par l'aliment



Il existe deux types de percepteurs visuels dans l'oeil :

- les bâtonnets qui sont les récepteurs de la clarté et de l'intensité ; ils ne donnent pas de vision des couleurs. La vision dépend des bâtonnets à la lumière de faible intensité
- les cônes qui sont responsables de la vision à la lumière de

plus forte intensité. Il y a 3 types de cônes, sensibles au bleu, vert/jaune et rouge.

Il est possible de recréer pour l'œil tous les stimuli colorés en mélangeant des quantités déterminées de trois stimuli colorés fondamentaux (la perception trichromatique) :

$$mM + nN + oO \rightarrow pP$$

où m , n , et o sont les quantités des trois stimuli fondamentaux M , N , et O qu'il faut mélanger pour obtenir un stimulus P d'intensité p .

La commission internationale de l'éclairage (C.I.E.) a défini l'espace physique des couleurs en se basant sur la théorie de la perception trichromatique. L'œil ne peut pas voir toutes les couleurs possibles. La figure 5.3.3 donne la courbe de la visibilité, et le tableau 5.3.1 les couleurs qui sont liées à des longueurs d'onde.

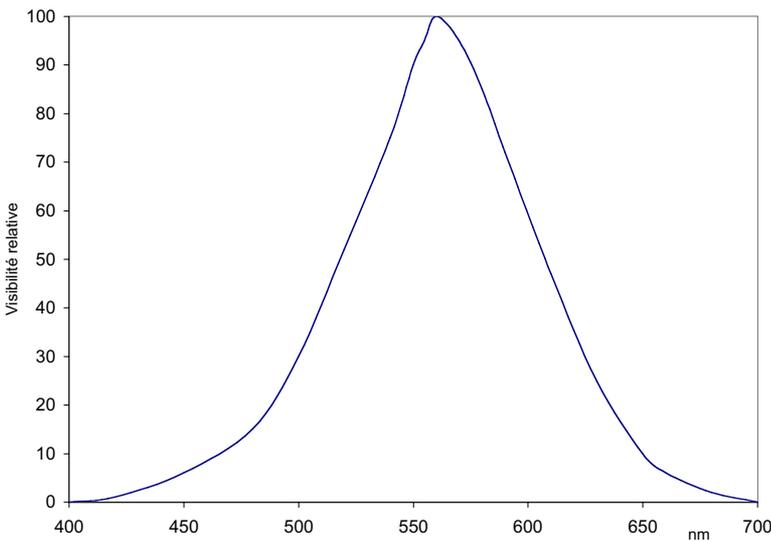


Figure 5.3.3
Courbe de la visibilité de l'œil humain

Un autre système est l'espace psychologique des couleurs de Munsell : il est beaucoup moins physique et beaucoup plus physiologique et psychologique que celui de la C.I.E. Dans le système Munsell, il y a 3 caractéristiques : la teinte (en Anglais : hue), l'intensité (en Anglais : value) et la nuance ou la saturation (en Anglais : chroma). En effet dans le système Munsell, la représentation des teintes et des nuances est faite au moyen d'échantillons de peinture sur papier, chaque échantillon présentant par rapport au suivant la plus petite différence possible perceptible par l'œil (limite ou seuil de différenciation ; ce seuil constitue d'ailleurs une mesure de la sensibilité de l'œil).

Les couleurs	λ (nm)
Violet	380 – 436
Bleu	436 – 495
Vert	495 – 566
Jaune	566 – 589
Orange	589 – 627
Rouge	627 – 780

Tableau 5.3.1
Les couleurs et les longueurs d'onde λ correspondantes

Il est difficile d'établir une corrélation entre la perception sensorielle et une mesure. Néanmoins, on détermine fréquemment la couleur d'un aliment avec des instruments pour avoir une idée de la couleur du point de vue de la qualité. Par exemple, une pomme rouge apparaît rouge à cause de l'absorption par les carotènes et les anthocyanes entre 400 et 600 nm et très peu d'absorption par la chlorophylle. Par conséquent, il y a réflectance de la lumière incidente entre 600 et 700 nm et on peut mesurer cela facilement avec des instruments et obtenir une impression objective du stade de maturité.

Pour obtenir une couleur constante, on peut ajouter à l'aliment des colorants naturels (exemples : chlorophylle, carotène, flavonoïdes, anthocyanes, betalaines) ou artificiels (exemples : tartrazine, amarante, érythrosine, brillant bleu).

5.3.5 Analyse sensorielle

Pour juger et contrôler la qualité organoleptique des produits alimentaires, on fait appel à des critères et à des méthodes d'évaluation de divers types :

- les jury de dégustation, c'est-à-dire l'exploitation systématique, dans des conditions statistiquement valables, des réactions de groupes représentatifs de consommateurs ou de personnes spécialement entraînées, auxquels on demande de se prononcer sur les caractères organoleptiques ;
- les échantillons représentatifs, préparés et présentés de manière normalisée ;
- des questions spécifiques, une température et une lumière constantes et standardisées, l'absence d'odeurs ;
- l'isolement des membres du jury ;
- la possibilité de cracher les échantillons et de rincer la bouche ;
- l'utilisation de codes.

Il existe deux types de tests de dégustation :

- Les techniques de comparaison : déceler l'existence d'une différence significative ramenant à l'analyse de variance.
- Les techniques descriptives du profil : classement quantitatif et semi-quantitatif des caractéristiques du produit par ordre chronologique de perception : d'abord les odeurs, puis les saveurs et les arômes et enfin l'arrière-goût.

5.3.6 Conclusion

Il est difficile de mesurer les propriétés organoleptiques des aliments. La meilleure méthode est d'utiliser un jury de consommateurs pour obtenir une impression du souhait du consommateur. On peut travailler avec un forum entraîné ou bien avec des consommateurs qui ne sont pas entraînés, dépendant de ce qu'on veut mesurer. En tout cas, il est nécessaire d'utiliser des méthodes statistiques pour être capable de rendre un jugement fiable. Il existe des méthodes spécifiques pour travailler avec des forums de

consommateurs ; ces méthodes sont trop spécifiques pour être discutées ici.

Travailler avec des forums de consommateurs est difficile et cher. C'est pourquoi on utilise aussi des analyses instrumentales. Cependant des préférences sont aussi déterminées par la culture, et même au niveau individuel. Donc, on ne peut pas généraliser certaines préférences pour tout le monde. La figure 5.3.4. donne une schéma récapitulatif de la complexité de la qualité organoleptique et les relations entre les mesures physiques et les perceptions humaines.

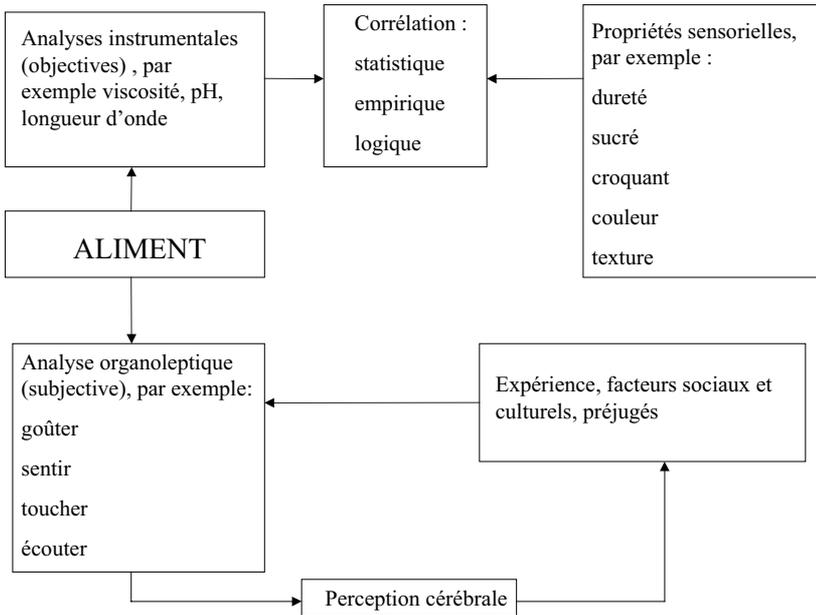


Figure 5.3.4
Schéma récapitulatif sur la mesure des propriétés organoleptiques.

5.4 Les conséquences nutritionnelles des traitements culinaires

5.4.1 Généralités

La qualité nutritionnelle est l'aptitude de l'aliment à bien nourrir. Cette notion comprend deux aspects :

- un aspect quantitatif : c'est l'énergie stockée sous forme chimique, apportée par l'aliment à la machine physiologique, et mesurable à la bombe calorimétrique ;
- un aspect qualitatif : c'est la recherche de l'équilibre nutritionnel de l'aliment au regard des besoins du consommateur, ou d'un enrichissement en un élément particulier (vitamine, fer...), ou encore d'une composition spéciale répondant à certaines pathologies, telles que les aliments sans sel, les produits diététiques.

Dans la plupart des cas, les opérations culinaires domestiques ou les traitements technologiques appliqués aux produits alimentaires se traduisent par des effets favorables sur la qualité, qu'il s'agisse de la valeur alimentaire ou de la qualité hygiénique. Les modifications favorables s'observent au niveau des qualités organoleptiques et plus particulièrement au niveau des arômes, du goût, mais aussi de la couleur et de la texture. Certains de ces traitements permettent de détruire des microorganismes dangereux, d'inactiver certains composés toxiques ou encore d'inhiber des enzymes capables de provoquer des réactions défavorables, en particulier sur la couleur ou le goût.

Malheureusement, il n'est pas rare que certains de ces traitements domestiques ou industriels affectent d'une façon plus ou moins importante la qualité initiale du produit. L'étude de ces modifications peut être envisagée soit en fonction du type d'aliment, soit en fonction des grandes catégories de nutriments qui entrent dans la composition de nos aliments, soit en fonction du type de traitement appliqué.

Beaucoup d'opérations unitaires, en particulier celles qui ne font pas intervenir la chaleur, ont peu ou pas d'effet sur la qualité nutritionnelle des aliments ; ces opérations incluent le mélange, le lavage, le triage, la lyophilisation et la pasteurisation. Les opérations qui séparent intentionnellement les composants des aliments altèrent la qualité nutritionnelle de chaque fraction comparé à la matière première. Une séparation non désirée des nutriments hydrosolubles (minéraux, vitamines hydrosolubles et sucres) se produit aussi au cours de certaines opérations.

Le traitement par la chaleur est la cause majeure des changements de propriétés nutritionnelles des aliments avec comme conséquences :

- l'amélioration de la digestibilité ;
- la destruction des facteurs antinutritionnels ;
- ou à l'opposé la destruction des vitamines thermolabiles ou la réduction de la valeur biologique des protéines, ou l'activation de l'oxydation des lipides.

L'oxydation est la seconde cause importante des changements nutritionnels dans les aliments. Ceci a lieu lorsque l'aliment est exposé à l'air, ou comme résultat de l'action de la chaleur ou des enzymes oxydatives.

L'importance des pertes de nutriments durant la transformation dépend de la valeur nutritionnelle d'un aliment dans le régime alimentaire. Certains aliments constituent une importante source de nutriments pour un grand nombre de la population. Les pertes en ces nutriments sont alors plus significatives dans ces aliments que dans ceux qui sont consommés en petites quantités ou ceux qui ont une faible concentration en ces nutriments.

5.4.2 Incidence des traitements domestiques ou industriels sur les glucides

Les glucides sont des composants abondants et souvent majoritaires de bon nombre de produits alimentaires. Ils sont essentiellement représentés par des polymères comme les amidons ou la cellulose, des dimères comme le saccharose ou le lactose, et par des monomères comme le glucose ou le fructose. Dans leur grande majorité, les traitements culinaires domestiques ou industriels ne se traduisent pas par des modifications importantes de leur disponibilité. Le traitement de l'amidon par la chaleur en milieu humide conduit à une gélatinisation qui correspond à une absorption d'eau, une augmentation de volume des granules d'amidon et une augmentation de la viscosité de la solution (cf. 5.2). C'est en raison de cette propriété que les amidons sont utilisés comme agents épaississants des sauces (cf. 5.2.4). Du point de vue nutritionnel, la gélatinisation des amidons se traduit généralement par une augmentation de leur digestibilité.

Le saccharose subit peu de modifications au cours des différents traitements sauf dans le cas de sa caramélisation. Le chauffage du saccharose en milieu acide, comme c'est le cas dans la cuisson des confitures de fruits, conduit à son hydrolyse en sucres simples, ce qui ne modifie pas sa valeur nutritionnelle. Les sucres simples, glucose et fructose, sont présents dans de nombreux produits de panification, de biscuiterie, de confiserie ou à base de fruits. Ces sucres réducteurs chauffés en présence d'acides aminés peuvent donner des réactions de Maillard (brunissement non enzymatique) qui rendent ceux-ci inutilisables pour l'organisme. Les réactions de Maillard peuvent se produire au cours de l'entreposage de céréales sèches si celui-ci s'effectue à des températures élevées ; mais elles sont surtout importantes dans les traitements de cuisson.

L'élimination mécanique des celluloses et autres composants de fibres alimentaires (hémicelluloses et lignines) des produits végétaux (céréales, tubercules, fruits et légumes) peut se traduire par une augmentation de la digestibilité des autres nutriments et plus particulièrement des protéines, mais n'oublions pas que ces polymères jouent un rôle physiologique important en favorisant le transit intestinal. De même l'élimination d'une partie des fibres des enveloppes des graines de céréales (polissage du riz, décortilage du maïs ou du sorgho) se fait au prix d'une perte en vitamines. Le choix d'un rendement d'extraction sera donc un compromis entre une teneur élevée en vitamines et une faible disponibilité de ces mêmes vitamines et aussi des minéraux du fait de la présence de fibres. La cuisson permet de ramollir les fibres et facilite donc leur ingestion, mais elle ne permet pas leur solubilisation, ni leur hydrolyse au cours de la digestion.

5.4.3 Incidence des traitements domestiques ou industriels sur les protides

Beaucoup de traitements ont des effets favorables sur la valeur nutritionnelle des protéines. Cependant des modifications défavorables apparaissent parfois. Dans la majorité des cas, elles se traduisent par une diminution des teneurs en acides aminés indispensables ou par la formation de substances antinutritionnelles ou toxiques.

La cuisson d'aliments riches en protéines conduit à leur dénaturation, c'est-à-dire à des modifications de la forme des molécules protéiques (la structure secondaire et tertiaire des protéines), qui n'affectent pas la chaîne d'acides aminés elle-même (la structure primaire). Cette dénaturation conduit à l'arrêt de l'activité biologique de la protéine et améliore sa valeur nutritionnelle de plusieurs façons. D'abord on peut citer l'augmentation de la digestibilité du collagène (viandes à cuisson longue) et de l'ovalbumine (blanc d'oeuf). Ensuite, l'inactivation des protéines antinutritionnelles de certaines légumineuses (soja, arachide, haricots, etc.) : les phytohémagglutinines. En dernier, l'inactivation d'une autre catégorie de protéines, les enzymes, qui ont de nombreux effets défavorables sur les nutriments (lipases, protéases, etc., cf. 2.3).

Le chauffage d'un aliment protéique en présence de sucres réducteurs comme le glucose, le lactose ou le fructose conduit au brunissement de cet aliment par les réactions dites de Maillard. Leurs conséquences nutritionnelles sont nombreuses : perte de disponibilité de la lysine, apparition de composés antinutritionnels, mais des substances antioxydantes sont également formées.

Ces réactions sont d'autant plus fortes que la température est élevée et se produisent surtout dans les aliments semi-humides. Elles provoquent aussi des modifications de goût et de couleur appréciées et même recherchées pour un grand nombre de produits (biscuits, viande rôtie, etc.). Les traitements thermiques à température élevée (entre 100 et 200 °C) comme la stérilisation ou la cuisson au four ou sur le feu provoquent la destruction des acides aminés, d'où une baisse de la valeur nutritionnelle de la protéine. Cela concerne :

- la désamination de l'asparagine et de la glutamine ;
- l'isomérisation de résidus d'acides aminés (L → D) ;
- des réactions entre molécules de cystéine avec formation de ponts covalents –S-S-, désulfuration, et formation de la molécule déhydroalanine ($R-CH_2-SH \rightarrow R=CH_2 + H_2S$)
- la formation de ponts covalents intra- ou intermoléculaires de nature isopeptidique (γ -glutamyl- ϵ -N-lysine) ou de type lysinoalanine ($R-CH_2-NH-(CH_2)_4-R'$, formée d'une réaction de déhydroalanine et lysine) et lanthionine ($R-CH_2-S-CH_2-R'$, formée d'une réaction de cystéine et déhydroalanine)

- la baisse de la digestibilité après un traitement thermique dur, surtout avec un traitement alcalin (extraction de protéines végétales, fabrication de caséinates, filage des protéines).

Quand la température est très élevée (viandes et poissons grillés au feu de bois par exemple), on observe la décomposition d'acides aminés en corps mutagènes (mais cela est spécifique pour la viande et le poisson parce que la présence de créatinine est nécessaire pour la formation des corps mutagènes). De nombreuses autres réactions peuvent s'observer dans des conditions particulières mais sont de moindre importance.

5.4.4 Incidence des traitements domestiques ou industriels sur les lipides

Les lipides peuvent subir au cours des traitements technologiques, des préparations culinaires ou de l'entreposage, de nombreuses modifications qui affectent leur valeur nutritionnelle. Pour l'essentiel, ces modifications se produisent sur les doubles liaisons d'acides gras insaturés et provoquent ainsi des pertes d'acides gras indispensables.

Les principaux phénomènes qui effectent la valeur nutritionnelle des lipides sont l'oxydation, l'hydrolyse (ou lipolyse) et la décomposition par la chaleur (cf. 2.3).

L'oxydation des lipides, c'est-à-dire le rancissement, est un phénomène qui se produit spontanément quand le lipide est au contact de l'air. Le rancissement est rapide et important pour les lipides riches en acides gras insaturés. Il se produit au cours du stockage à température ambiante ou en réfrigération et même sur les produits congelés. L'oxydation peut être limitée en protégeant le produit d'un contact avec l'air. La principale conséquence de l'oxydation est l'apparition d'une odeur et d'un goût rances qui peuvent rendre l'aliment inconsommable. Il se produit une légère perte de valeur nutritionnelle. L'addition d'agents anti-oxydants est souvent utilisée pour limiter les risques de rancissement. Notons enfin que le chauffage accélère les processus d'oxydation donnant aussi des composés nocifs; ce sont des peroxydes.

L'hydrolyse des lipides est possible et le chauffage à température élevée (170-200 °C) des matières grasses peut conduire à une hydrolyse. C'est notamment un problème dans le cas des fritures du fait d'apport d'eau par l'aliment à frire.

Pour éviter ces phénomènes d'hydrolyse et d'oxydation, il convient d'abord de n'utiliser en friture que des huiles très stables à la chaleur (comme l'huile d'arachide), de ne pas dépasser 180 °C, de limiter le temps de chauffe et surtout le nombre de réutilisations de l'huile de friture. Sinon, on risque d'éliminer les acides gras essentiels et une accumulation des composés toxiques dans l'huile de friture.

5.4.5 Incidence des traitements domestiques ou industriels sur les minéraux

Des pertes en éléments et sels minéraux sont susceptibles de se produire dans nos aliments d'une part par élimination mécanique de certaines parties de l'aliment (parage des fruits, blutage des céréales), et d'autre part au cours de traitements dans l'eau (blanchiment et cuisson dans l'eau), les sels minéraux solubles diffusant alors de l'aliment vers la phase aqueuse.

5.4.6 Incidence des traitements domestiques ou industriels sur les vitamines

L'étude du comportement des vitamines au cours de la préparation des aliments est un sujet fort complexe. D'une part les treize vitamines ont des sensibilités bien spécifiques aux différentes conditions ou agents susceptibles de les détruire. D'autre part, les technologies sont nombreuses et variées.

Dans la pratique, ce qui importe est de pouvoir estimer les teneurs en vitamines présentes dans l'aliment au moment de sa consommation. Le fait de l'exprimer en pourcentage de couverture des apports quotidiens conseillés (AC) renseigne sur l'intérêt nutritionnel de l'aliment en l'une ou l'autre des vitamines. C'est ainsi qu'il est moins grave de détruire la vitamine C présente dans le lait (1 à 2 % des AC dans 100 ml) que celle du jus d'agrumes (plus de 40 % des AC dans 100 ml). De même, il importe de préserver la vitamine E des huiles végétales car elles en sont une des principales sources.

En ce qui concerne la responsabilité respective des traitements ménagers ou industriels dans les pertes en vitamines, il est fréquent qu'ils se substituent les uns aux autres. Ainsi dans le cas des légumes, l'épluchage, le lavage et le blanchiment industriel remplacent le stockage, l'épluchage et le lavage à la maison.

Les vitamines ne constituent pas un ensemble de corps ayant une parenté chimique ; elles sont très différentes les unes des autres et chacune a sa constitution propre, bien définie, son activité spécifique, ses sources très variées. Elles ont cependant en commun le fait d'être actives en très petites quantités.

Suivant leurs propriétés et les conditions de leur conservation, on peut classer les vitamines en deux grands groupes, selon leur solubilité :

- les vitamines solubles dans l'eau ou hydrosolubles : le groupe des vitamines B, et la vitamine C ;
- les vitamines solubles dans les lipides ou liposolubles : les vitamines A, D, E, K.

Cette distinction est utile, car elle permet en pratique :

- de ne pas commettre trop de confusions sur les aliments où se trouvent les vitamines. Ainsi, les vitamines liposolubles ne peuvent se trouver que dans un aliment gras, ceci ne voulant

pas dire que tous les aliments gras renferment toutes ces vitamines ;

- de mieux comprendre tout ce qui touche à la conservation des vitamines ; en effet, les vitamines hydrosolubles passent dans l'eau dès que l'aliment est en contact d'une importante quantité d'eau (trempage, cuisson, etc.) ;
- d'être attentifs à certains risques de surdosage, en ce qui concerne les vitamines liposolubles.

La stabilité des vitamines dans les aliments dépend de leur sensibilité respective aux différents facteurs physiques ou chimiques auxquels ils sont soumis pendant le traitement, le stockage ou la préparation de ces aliments. Les plus importants sont la température, l'oxygène, la lumière, l'humidité et le pH.

Les sensibilités particulières de chaque vitamine à ces différents agents sont les suivantes :

- La vitamine A (rétinol), le bêta-carotène (provitamine A) et la vitamine D (calciférol) sont sensibles à l'oxydation, laquelle dépend naturellement de la présence d'oxygène et d'agents oxydants. Elle est catalysée par les traces de métaux et accentuée par la lumière et la chaleur. Les pH proches de la neutralité sont les plus favorables à la stabilité de ces vitamines. La présence de matière grasse non oxydée joue pour elles un effet protecteur.
- La vitamine E sous forme d'acétate de tocophérol est assez stable. Par contre, les tocophérols libres sont sensibles à l'oxydation, la lumière et la chaleur, particulièrement aux pH basiques.
- La vitamine K₁ est sensible à la lumière, aux oxydants et aux bases.
- La vitamine C est particulièrement sensible à l'oxydation et par conséquent, aux catalyseurs d'oxydation (métaux), à la chaleur et à la lumière. Cette sensibilité est accentuée par l'humidité et par les pH basiques et acides forts. Les conditions les plus favorables sont les pH légèrement acides (pH 3 - 5), d'où l'intérêt de l'assaisonnement acide des crudités (vinaigres, ou mieux jus de citron, naturellement riche en vitamine C). La présence d'agents réducteurs (sulfites ...) limite la dégradation de la vitamine C. La teneur résiduelle dans les aliments est souvent fonction de la durée de stockage.
- La vitamine B₁ craint particulièrement la chaleur et les milieux basiques. La lumière et l'humidité sont également facteurs de dégradation.
- La vitamine B₂ est très sensible à la lumière et aux rayons ultra-violet. Les milieux basiques et les agents réducteurs lui sont défavorables. Dans les autres conditions, elle est relativement stable.
- L'acide pantothénique est décomposé par hydrolyse et donc sensible à la chaleur, aux acides et aux bases.

- Les vitamines B₆ et biotine sont relativement stables.
- La vitamine B₁₂ est décomposée par les agents réducteurs (dont la vitamine C), les acides et les bases. La lumière et l'humidité accentuent cet effet.
- L'acide folique est sensible aux agents oxydants et réducteurs ; à un degré moindre, il craint la lumière, les acides et les bases.

Les facteurs susceptibles de détruire l'une ou l'autre des vitamines sont donc multiples. Heureusement, les conditions les plus défavorables sont loin d'être toujours remplies dans les aliments. Les vitamines C et B₁ étant les plus fragiles sont souvent utilisées comme traceurs du maintien de la qualité nutritionnelle des aliments au cours des traitements.

Tableau 5.4.1
Modifications des vitamines au cours des traitements culinaires.

traitement	vitamines hydrosolubles									vitamines liposolubles		
	C	B ₁	B ₂	B ₅	B ₆	B ₁₂	niacine	folate	biotine	A	D	E
post mortem ou après récolte	D						D					
épluchage, parage	PP						PP					
broyage, meunerie		PPP	PP	P	PPP	PP	PPP	PP			P	
lavage	P	p	p	p	p	p	p	p				
traitement thermique dans l'eau	PP, D	P, D	P, d	P, d	P, d	P	P, F	p, d, F		D		
cuisson vapeur	p, d	p, d	p, d	p, d	p, d	p	P, f	p, d, F		D		
réaction de Maillard	D								d	d	D	D
oxydation	D								d	d		
sulfites	F	D				d			d			
nitrites	d	D							d			
oxyde d'éthylène		D										
traitement alcalin	d	D	d	d	D	d		d	d			
séchage à l'air	d				d	d			d	D	d	
lumière											D	
irradiation	D	d	d			d				D	d	D
cystéine					D	F						
composés carboxylés		d		d	d							

P: perte importante (P) ou minime (p) par élimination mécanique ou diffusion le plus souvent dans l'eau
D: destruction importante (D) ou minime (d)

F: effet favorable par génération d'une forme active

La teneur en vitamines des produits alimentaires est extrêmement variable après récolte; elle dépend par exemple du degré de maturité quand il s'agit des produits végétaux. Toutes les vitamines ne sont pas aussi sensibles aux différents traitements. Le tableau 5.4.1. illustre les modifications des vitamines au cours des traitements culinaires. Au cours de la cuisson dans l'eau des légumes en particulier, mais aussi de la viande de type pot-au-feu, une

proportion de vitamines hydrosolubles passe dans l'eau de cuisson et est donc perdue si ce bouillon n'est pas consommé. Pour donner un exemple, la figure 5.4.1 illustre les différents niveaux de perte en vitamine C dans un légume selon les techniques utilisées.

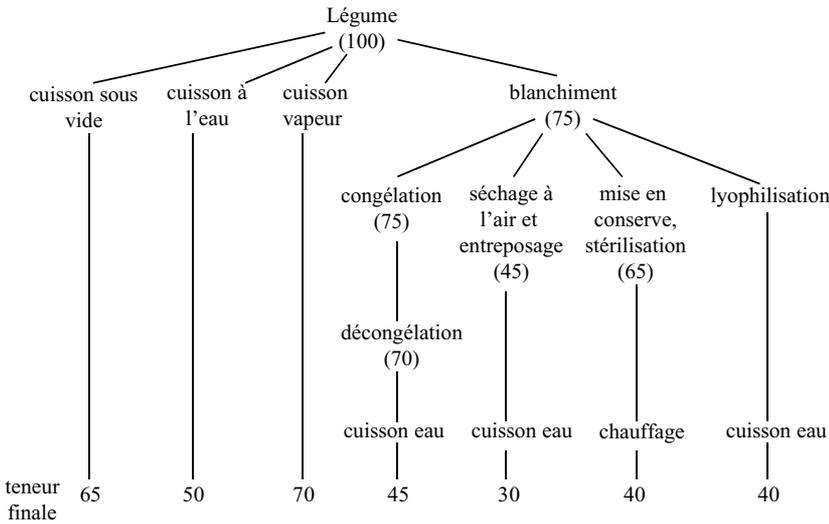


Figure 5.4.1

Evolution de la teneur en vitamine C d'un aliment type légume au cours des traitements culinaires.

5.4.7 Quelques opérations unitaires et leur influence sur la valeur nutritionnelle des aliments

5.4.7.1 La réduction de taille

La réduction de taille est l'opération par laquelle la taille moyenne des particules solides constituant l'aliment est réduite par l'application de la mouture, la compression, etc. La rupture des cellules et l'augmentation de la surface de contact qui en résulte provoquent des réactions oxydatives au niveau des acides gras et de la vitamine A. La perte de vitamine C et de la thiamine dans les fruits et légumes est substantielle (78 % dans le concombre). La perte de ces nutriments pendant le stockage dépend de la température, de la teneur en eau de l'aliment et de la concentration d'oxygène pendant le stockage.

Dans les aliments secs, la principale perte de nutriments est due au tamisage et à la séparation des différentes parties après la réduction de taille des particules. C'est le cas par exemple de l'enlèvement du son du riz (Tableaux 5.4.2 et 5.4.3) : les grains de riz sont débarrassés de leurs enveloppes (glumes et glumelles) ; on obtient ainsi le "riz cargo". On peut ensuite retirer la pellicule

	Thiamine	Riboflavine	Niacine
Riz paddy	0,34	0,055	5,41
Riz blanc	0,05	0,019	1,64
Riz précuit (étuvé)	0,25	0,038	3,22

Tableau 5.4.2

La teneur en vitamines B (mg/100 g) de différents grains de riz

jaune-brun, qui adhère fortement au grain, pour obtenir le "riz blanchi". Cette opération se fait en rabotant le grain entre deux cônes ou deux cylindres : on retire ainsi le péricarpe et la partie la plus externe de la couche à aleurone. Or cette couche est riche en protéines, en minéraux et surtout en vitamine B₁.

Tableau 5.4.3a

Effet de la mouture sur la teneur en vitamines de certains grains (proportion pour 100 g)

Produit	Vitamine A UI	Tocophérol (mg)	Thiamine (mg)	Riboflavine (mg)	Niacine (mg)
Maïs					
grain	400	1,43	0,15	0,12	1,7
farines	340	-	0,20	0,06	1,4
Riz					
grain	0	0,68	0,34	0,05	4,7
grain blanc	0	0,10	0,07	0,03	1,6
son	0	-	2,26	0,25	29,8
Blé					
grain	0	1,35	0,57	0,12	4,3
80 % extraction	-	-	0,25	0,08	1,6
70 % extraction	-	-	0,08	0,05	1,1
son	0	1,71	0,72	0,35	21,0

Tableau 5.4.3b

Effet de la mouture sur la teneur en vitamines de certains grains (proportion pour 100 g)

Produit	Vitamine C UI	Acide pantothénique (mg)	Vitamine B ₆ (mg)	Acid folique (mg)	Biotine (µg)
Maïs					
grain	12	0,54	0,16	26,8	11,0
farines	-	-	-	-	-
Riz					
grain	0	1,10	0,55	20,2	12,0
grain blanc	0	0,55	0,17	14,1	5,0
son	0	2,8	2,5	150,0	60,0
Blé					
grain	0	1,5	0,4	14,4	12,0
80 % extraction	-	0,9	0,11	13,0	1,4
70 % extraction	-	0,7	0,06	10,0	1,1
son	0	2,9	0,82	155,0	49,0

5.4.7.2 La fermentation ou la technologie d'utilisation des enzymes

Dans les systèmes de fermentation alimentaire, l'action contrôlée de microorganismes sélectionnés est utilisée pour modifier la texture des aliments, pour préserver les aliments par la production d'acides et d'alcool ou pour produire de subtiles saveurs et arômes, qui augmentent la qualité et la valeur des matières premières. Les principaux avantages de la fermentation comme méthode de transformation sont :

- l'utilisation de conditions douces de pH et de température qui maintiennent (et souvent améliorent) les propriétés nutri-

- tionnelles et les caractéristiques sensorielles de l'aliment ;
- la production d'aliments qui ont des saveurs ou une texture qui ne peuvent pas être obtenues par d'autres méthodes ;
- une faible consommation d'énergie due aux douces conditions d'opération ;
- un coût d'opération relativement faible et
- une technologie relativement simple.

La séparation d'enzymes des cellules microbiennes, ou d'origine animale ou végétale pour une utilisation *in vitro* dans la transformation des aliments est d'un développement assez récent. Les principaux avantages de l'utilisation des enzymes ainsi séparées et purifiées sont :

- des changements hautement spécifiques au niveau des aliments ;
- une perte minimum de qualité nutritionnelle à la température modérée utilisée ;
- une consommation d'énergie plus faible que les réactions chimiques correspondantes et
- la production de nouveaux aliments.

Le développement des microorganismes cause des changements complexes à la valeur nutritive des aliments fermentés en changeant la composition des protéines, des matières grasses et des glucides, et en utilisant ou en sécrétant des vitamines.

Protéines : La fermentation de la farine de maïs avec des levures pures, *S. cerevisiae* et *C. tropicalis*, augmente la teneur en protéines de 7,6 à 8,9 et 8,4 % respectivement. Le taux de protéines augmente ultérieurement à 16,4 et 14,5 % respectivement, lorsque les levures sont utilisées avec du malt de maïs dans la farine de maïs. Cependant, la matière sèche perdue est de 52,4 et 14 %, respectivement. D'autres études montrent que la fermentation naturelle ou avec des levures des céréales améliore légèrement le taux de protéines, ce qui peut être attribué à la perte de matière sèche, principalement des glucides.

Bien que les changements quantitatifs soient minimum au niveau des protéines, on a observé des modifications qualitatives significatives pendant la fermentation naturelle. On a observé par exemple une augmentation significative des acides aminés essentiels pendant les trois premiers jours de la fermentation naturelle de la farine de maïs par des bactéries protéolytiques : 30 % pour la lysine et 20 % pour la méthionine.

On a noté aussi une augmentation significative du taux de lysine disponible chez le riz, le mil, le maïs et le blé, après 6 jours de fermentation.

Vitamines : Bien que la fermentation lactique naturelle des céréales et des mélanges céréales-légumineuses s'est révélée comme facteur d'amélioration de la teneur en certaines vitamines du groupe B, des variations considérables ont été observées dans différents rapports. L'augmentation ou la diminution de la teneur

en vitamines varie avec la nature de la matière première, la nature de la microflore, la température et les méthodes de détermination de ces vitamines.

Un auteur a trouvé que la teneur en thiamine diminue lorsque le sorgho est mis à fermenter pendant 4 jours 25 °C, alors que les échantillons non fermentés et ceux mis à fermenter à 35 °C n'ont pas connu de variation significative. Les teneurs en thiamine, en riboflavine et en niacine augmentent de manière significative pendant la fermentation du sorgho et du mil (Tableau 5.4.4). Une augmentation significative de la teneur en vitamine B12, en folacine, en riboflavine et en acide pantothénique a été notée après 4 jours de fermentation naturelle de la farine de maïs. D'autres auteurs ont rapporté une augmentation significative de la teneur en riboflavine et une diminution de la teneur en niacine dans le niébé et le pois chiche. Le tableau 5.4.5 résume quelques résultats obtenus pour les produits fermentés à base de lait et de soja. Ces résultats montrent que les changements de teneur en vitamines notés sont influencés par beaucoup de facteurs qui incluent la matière première utilisée, le traitement qu'elle a subi, les microorganismes responsables de la fermentation, etc.

Tableau 5.4.4
Changement de teneur en vitamines (µg/g) du groupe B pendant la fermentation des céréales

Céréales	Thiamine	Riboflavine	Niacine
Sorgho			
Non fermenté	20,20	0,90	37,9
Fermenté	47,10	1,30	41,3
Riz			
Non fermenté	0,51	0,80	63,08
Fermenté	0,35	1,35	41,60
Mil			
Non fermenté	0,37	0,19	-
Fermenté	0,64	0,36	-

Tableau 5.4.5
Changement de teneur en vitamines de quelques aliments après fermentation (changement pour 100 g)

Les facteurs antinutritionnels, tels que les inhibiteurs de protéase, les lectines, les sucres responsables de la flatulence, les tanins et les agents liants des métaux, sont présents en concentration élevée dans beaucoup d'aliments à base de légumineuses. De même, la plupart des céréales contiennent des quantités appréciables de phytates alors que certaines céréales comme le sorgho et le

Produit	Thiamine (mg)	Riboflavine (mg)	Niacine (mg)	Vitamine C (mg)	Acide Pantothénique (mg)	Vitamine B ₆ (mg)	Vitamine B ₁₂ (µg)
Lait	0,04	0,18	0,1	1	0,37	0,042	0,4
Yaourt	0,04	0,18	0,1	1	-	0,040	-
Fromage	0,03	0,46	0,1	0	0,50	0,08	1,0
Soja (non fermenté)	0,22	0,06	0,90	-	-	0,08	-
Tempeh	0,13	0,49	0,39	-	-	0,35	-
Sauce soja	0,88	0,37	6,0	-	-	-	-

mil contiennent des quantités importantes de polyphénols et de tannins.

Les effets antinutritionnels et toxiques de ces composés sont connus. Les tannins forment par exemple des complexes avec les protéines, réduisant ainsi leur disponibilité. Les phytates forment des complexes avec les minéraux divalents (calcium, fer, magnésium, etc.), réduisant ainsi la disponibilité de ces nutriments. Elles réagissent également avec les protéines pour former des complexes protéino-phytates.

La réduction ou l'élimination de ces facteurs anti-nutritionnels est un objectif important à atteindre au cours des processus de transformation. Des opérations telles que le dépelliculage ou le trempage ou la germination réduisent ou éliminent les tannins.

Plusieurs chercheurs ont observé une réduction significative ou une élimination totale de certains facteurs antinutritionnels dans les céréales, les légumineuses et les oléagineux après une fermentation naturelle. Par exemple, on a observé une réduction significative de l'activité antitrypsique, du phytate de phosphore et des sucres de flatulence dans le maïs et les mélanges maïs-soja après 4 jours de fermentation (Tableau 5.4.6). Cette réduction peut être attribuée à la dégradation microbienne de ces composés pendant la fermentation.

Traitement	AIT (unité/g)	Raffinose %	Stachyose %	Phyate-P (mg/g)
Farine de maïs				
Non fermenté	2,5	0,30	-	0,22
Fermenté	1,8	0,10	-	0,05
Farine de soja				
non fermenté	112,2	1,48	4,2	-
Mélange Maïs-soja				
fermenté				
90 : 10	1,6	0,20	0,40	0,13
85 : 15	1,4	0,10	0,20	0,11
80 : 20	1,4		-	0,15

Fermentation à 32 °C, 4 jours

Plusieurs études ont également montré que la fermentation lactique améliore la disponibilité des minéraux. Par exemple, la fermentation lactique augmente la disponibilité du fer dans le sorgho. Cette disponibilité est doublée lorsque le sorgho est décortiqué avant la fermentation. Elle est multipliée par 6 quand la céréale a été soumise à la fois à la germination et à la fermentation.

Les graines de céréales et de légumineuses, surtout celles d'arachide peuvent être contaminées par l'aflatoxine par suite des conditions de récolte et de stockage défectueuses. Des études récentes ont montré que le procédé traditionnel de production d'ogui (une pâte fermentée de maïs ou de sorgho) contribue à une réduction de la teneur en aflatoxine B1 du sorgho variant entre 69 et 74 %.

Tableau 5.4.6
Effets de la fermentation sur l'activité de l'inhibiteur de trypsine (AIT), les sucres de flatulence et le phytate dans le maïs et le mélange maïs-soja.

La réduction du pH à un niveau inférieur à 4,5 (ou augmentation de l'acidité) qui se produit lors de la fermentation lactique ne favorise pas le développement des microorganismes pathogènes dans l'aliment. En outre, la production de substances antimicrobiennes contribue également à l'inhibition des pathogènes. La consommation des aliments fermentés empêcherait la colonisation des pathogènes envahisseurs, augmentant ainsi la résistance du système intestinal.

5.4.7.3 Application de la chaleur et techniques de cuisson

Le traitement par la chaleur est l'une des plus importantes méthodes utilisées dans la transformation des aliments, non pas seulement à cause des effets désirables qu'il a sur les qualités organoleptiques des aliments (beaucoup d'aliments sont consommés à l'état cuit) mais aussi à cause de l'effet de conservation qu'il a sur les aliments par la destruction des enzymes, des parasites, des insectes, et de l'activité microbienne. Les principaux avantages de la transformation par la chaleur sont (sans parler du fait que les pathogènes sont détruits) :

- la destruction des composants anti-nutritionnels des aliments (par exemple l'inhibiteur de la trypsine dans les légumineuses) ;
- l'amélioration de la disponibilité de certains nutriments (par exemple la digestibilité des protéines, la gélatinisation de l'amidon etc.) ;
- le contrôle relativement simple des conditions de transformation.

En général, le chauffage à des températures élevées pendant des périodes plus longues entraîne une plus grande destruction des microorganismes et des enzymes. Des procédés de température élevée-temps court permettent de prolonger la durée de conservation autant que les traitements à plus faibles températures et pendant des périodes plus longues, mais ces procédés permettent une plus grande rétention des propriétés sensorielles et nutritives des aliments.

5.4.8 Conclusion

Dans la plupart des cas, les traitements technologiques des aliments ont des effets bénéfiques car ils permettent à une grande variété d'aliments saisonniers d'être disponibles sur le marché sous une forme attractive, de bonne qualité sanitaire, organoleptique et nutritionnelle. Cependant, certaines modifications défavorables apparaissent parfois notamment lors des traitements mal contrôlés ou excessifs. Ces modifications affectent la qualité nutritionnelle des aliments. C'est ainsi que la structure primaire des protéines se trouve modifiée, entraînant une diminution de la teneur et/ou de la disponibilité biologique en acides aminés indispensables ou par la formation de substances antinutrition-

nelles ou éventuellement toxiques. Ces modifications peuvent être très préjudiciables pour certaines catégories de consommateurs tels que les enfants en bas âge, les personnes âgées et/ou les populations sous-alimentées, dont l'alimentation ne repose que sur un nombre limité de produits comme le lait, les céréales ou les légumineuses.

5.5 L'analyse et la maîtrise de la qualité des aliments

5.5.1 Aspects de statistique

Si on veut établir la qualité des aliments, il faut la mesurer. L'analyse des aliments n'est pas facile à cause de la variabilité des matières premières, à cause de la structure complexe des aliments et aussi à cause de l'inévitable variabilité des analyses. Supposons par exemple un résultat d'analyse selon la méthode de Kjeldahl qui donne un résultat de 3,8 % de protéines, alors que la norme préétablie = 4 %. La question est maintenant de savoir si le résultat de 3,8% est acceptable ? On ne peut pas répondre à cette question simplement. Pour l'interprétation des résultats, il est nécessaire de déterminer l'exactitude et la précision de l'analyse. L'exactitude représente la différence entre le résultat obtenu et la valeur réelle. Bien qu'on ne sache jamais la valeur réelle (sinon ce n'est pas nécessaire d'analyser !), on est obligé d'étalonner les méthodes utilisées. L'étalonnage est nécessaire pour déterminer l'exactitude du résultat obtenu. Cette démarche relève de la responsabilité du chercheur ! La précision permet de connaître la dispersion entre les valeurs obtenues après quelques répétitions d'analyse. Il faut qu'on réalise que les résultats d'analyse ne sont jamais pareils : on a toujours une variabilité quelle que soit la méthode utilisée. Cependant la valeur actuelle de la précision dépend de la propriété de la méthode utilisée et de l'expérience du chercheur. Des méthodes statistiques sont nécessaires pour apprécier les résultats d'analyse. Pour éclaircir la différence entre l'exactitude et la précision on peut les exprimer d'une façon imagée comme une cible sur la figure 5.5.1.

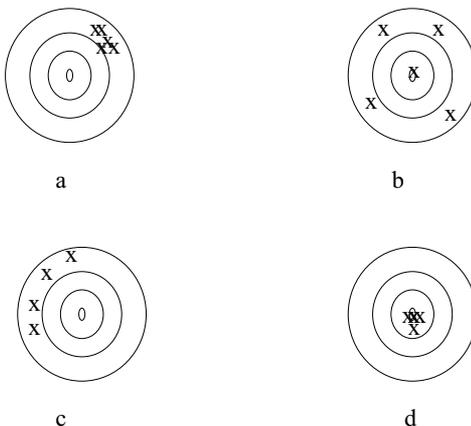


Figure 5.5.1

Représentation de la différence entre l'exactitude et la précision. a. très précis, mais pas exact, b. exact, mais pas très précis, c. ni exact, ni précis, d. exact et précis.

Dans l'exemple d'analyse de 3,8% de protéine, supposons l'écart-type $s = 0,1$ % (alors $3,8 \pm 0,1\%$) obtenu avec 4 répétitions et nous voulons savoir à 95 % l'intervalle de confiance pour la moyenne de cette analyse. L'équation concernée est :

$$(5.5.1) \quad \bar{x} \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n_N}}$$

et la valeur t pour $n_N=4$ est 2,78 (on peut trouver cette valeur dans les livres statistiques). Alors, on peut calculer l'intervalle de confiance à 95% comme :

$$(5.5.2) \quad 3,8 \pm 2,78 \cdot \frac{0,1}{\sqrt{4}} = 3,8 \pm 0,14$$

C'est-à-dire que la valeur préétablie (4%) n'est pas comprise dans l'intervalle, autrement dit, on peut constater que la teneur en protéine trouvée est trop faible. Cependant, si l'écart-type $s = 0,1$ %, obtenu après 2 répétitions, la valeur $t = 4,30$ et l'intervalle de confiance à 95% est maintenant :

$$(5.5.3) \quad 3,8 \pm 4,30 \cdot \frac{0,1}{\sqrt{2}} = 3,8 \pm 0,30$$

Dans ce cas, la teneur en protéine est encore acceptable. Cet exemple montre qu'on a vraiment besoin de la connaissance statistique pour être capable de juger les résultats obtenus. Cet exemple montre aussi l'importance d'avoir des répétitions disponibles : on peut améliorer la précision avec des répétitions ! (Ceci n'est pas possible pour l'exactitude).

Fréquemment, on utilise quelques résultats expérimentaux pour calculer une valeur finale. Par exemple, pour calculer une densité, on doit mesurer le volume et la masse d'un matériel. Les erreurs de toutes les deux mesures sont propagées dans le résultat final. Il existe quelques règles pour calculer la propagation des erreurs.

1) Addition et soustraction

Supposons, par exemple, les résultats suivants pour le séchage d'un échantillon. Le poids avant séchage (\pm l'écart-type) $M_1 = 100 \pm 0,5$ g et après séchage $M_2 = 20 \pm 0,1$ g. La teneur en eau est donc $M_1 - M_2 = 80$ g, mais quelle est la précision dans ce résultat? Les règles pour l'addition et la soustraction sont d'ajouter les variances (s^2) des deux analyses :

$$(5.5.4) \quad s^2 = s_{M_1}^2 + s_{M_2}^2$$

Alors dans l'exemple, l'écart-type de la teneur en eau est :

$$s = \sqrt{0,5^2 + 0,1^2} = 0,51$$

et le résultat final est donc $80 \pm 0,51$ g.

L'équation (5.5.4) montre aussi qu'il faut réduire l'écart-type le plus grand!

2) Multiplication et division

Prenons un autre exemple, la détermination de la densité ρ d'un liquide. La densité est calculée à partir de la masse M et du volume V comme suit :

$$\rho = \frac{M_1 - M_2}{V} \quad (5.5.5)$$

M_1 est le poids de la bouteille et M_2 le poids de la bouteille + échantillon. Comment peut-on exprimer l'écart-type d'un tel calcul? Le coefficient de variation est défini comme :

$$CV = \frac{s}{x} \quad (5.5.6)$$

Pour la multiplication et la division on doit maintenant additionner les coefficients de variation CV au carré, c'est alors l'écart-type relatif (l'écart-type divisé par la valeur x). Pour l'exemple de densité on trouve maintenant :

$$CV_M = \frac{s_M}{M} = \frac{s_{M_2} - s_{M_1}}{M_2 - M_1} \quad (5.5.7)$$

et (comparer à l'équation 5.5.4) :

$$s_M = \sqrt{s_{M_2}^2 + s_{M_1}^2} \quad (5.5.8)$$

et

$$CV_V = \frac{s_V}{V} \quad (5.5.9)$$

Comme indiqué ci-dessus, on doit maintenant additionner les CV au carré :

$$CV_\rho^2 = CV_M^2 + CV_V^2 \quad (5.5.10)$$

Si on a trouvé la valeur CV_D on peut finalement calculer l'écart-type s_ρ :

$$s_\rho = \rho \cdot CV_\rho \quad (5.5.11)$$

5.5.2 Analyses des aliments

Il existe de nombreuses méthodes pour analyser la teneur en composants dans les aliments, la qualité microbienne et la qualité physique. Il n'est pas possible de discuter ces méthodes ici en détail, surtout parce qu'elles évoluent dans le temps. Nous mentionnerons seulement quelques méthodes utilisées fréquemment. Diverses méthodes sont utilisées pour déterminer la teneur en **protéines** dans les aliments :

- la méthode de Kjeldahl qui permet de doser la ANP (l'azote

non-protéique) ; le taux de protéines est obtenu en multipliant l'ANP par un facteur de conversion.

$6,25 \times N \% = \% \text{ protéines}$; le facteur de conversion varie selon l'aliment (exemple : lait : $6,38 \times N \%$).

- le dosage des acides aminés (hydrolyse avec l'acide chlorhydrique) avec un analyseur d'acides aminés (chromatographie) ;
- les méthodes biologiques.

Pour les **lipides** plusieurs méthodes sont utilisées parmi lesquelles :

- l'extraction par le Soxhlet (méthode gravimétrique),
- la détermination des acides gras après saponification (généralement on utilise la chromatographie en phase gazeuse).

Pour les **glucides** plusieurs méthodes sont aussi utilisées :

- dosage des sucres réducteurs (par exemple la méthode de Guilleminot et Jacquot ou de Luff Schoorl)
- HPLC (chromatographie en phase liquide).
- Méthode polarimétrique pour le dosage de l'amidon.

La **valeur calorique** est déterminée par la chaleur de combustion (énergie brute) ou par le coefficient moyen d'Atwater (énergie métabolisable).

Les **vitamines** peuvent être déterminées par HPLC ou par des méthodes chimiques et microbiologiques.

Plusieurs méthodes existent pour l'analyse des **sels minéraux** telles que l'incinération, la SAA (spectrophotométrie à absorption atomique). Les méthodes chimiques sont aussi utilisées pour leur dosage.

Parmi les diverses méthodes utilisées pour mesurer l'**oxydation** on peut citer :

- l'absorption d'oxygène par un liquide, l'augmentation du poids du liquide, la concentration d'oxygène dans l'atmosphère (électrode à oxygène).
- les diènes conjugués ($C=C-C=C$) : $\lambda = 233 \text{ nm}$,
- l'iodométrie : $ROOH + 2 H^+ \rightarrow ROH + I_2 + H_2O$
- la teneur en peroxydes
- l'essai à l'acide thiobarbiturique qui réagit avec l'aldéhyde malonique pour donner un pigment de $\lambda = 532 \text{ nm}$. Cet essai a une bonne corrélation avec la rancidité organoleptique ;
- la réaction de 2,4 – dinitrophénylhydrazine avec les composés carbonyles totaux ;
- l'indice d'iode qui mesure le nombre de double liaisons.

Plusieurs paramètres sont utilisés pour l'évaluation de la **réaction de Maillard** :

- couleur, réflexion, absorbance, $\lambda = 420 - 540 \text{ nm}$;
- lysine disponible ;
- HMF (hydroxyméthylfurfural, un intermédiaire dans la réaction de Maillard) : $\lambda = 285 \text{ nm}$;
- produit d'Amadori dosé par HPLC (produit de protéines obtenu après hydrolyse dans HCl 6N conduisant à la furosine).

En ce qui concerne l'**analyse microbiologique** on utilise encore les méthodes traditionnelles, c'est-à-dire la croissance des micro-organismes ; les normes pré-établies pour la plupart des aliments sont :

- Flore aérobie mésophile : $< 10^5/g$
- Coliformes fécaux : $< 1/g$
- *Salmonella* : absence dans 25 g
- Germes anaérobies sulfito-réducteurs : 10/g
- *Staphylococcus aureus* : $< 100/g$

La préparation de l'échantillon doit obéir à une méthodologie adéquate :

- prélèvement réalisé dans des conditions rigoureuses d'asepsie ;
- analyse le plus rapidement possible (ou réfrigération/congélation adéquate) ;
- homogénéisation de l'échantillon (la plupart des aliments sont hétérogènes)

On peut prédire les types microbiens que l'on a le plus de chance de rencontrer. Pour les micro-organismes pathogènes, on a souvent recourt à un enrichissement sélectif, un isolement et l'identification.

De nos jours on utilise de plus en plus des techniques nouvelles comme l'immunofluorescence et l'immunoenzymologie issues de la biologie moléculaire (l'hybridation ADN/ARN, le PCR qui permet une recherche très rapide et spécifique de certaines bactéries).

Pour évaluer **la texture et les propriétés rhéologiques**, il existe aussi beaucoup de méthodes, qui sont parfois très empiriques. Nous mentionnerons les viscosimètres à rotation et les pipettes d'Ostwald pour mesurer la viscosité. Les propriétés viscoélastiques peuvent être mesurées par des appareils qui effectuent des mesures vibrationnelles ou par un pénétromètre qui pénètre dans un aliment à une certaine distance et en un certain temps.

L'activité de l'eau a_w peut être mesurée en mettant en équilibre un aliment dans un dessiccateur contenant des solutions avec une a_w connue (cf. Tableau 5.5.1.). Après que l'équilibre est réalisé, on peut exprimer les résultats sur une courbe de sorption/désorption.

Solutions	a_w
Eau pure	1
Saccharose 80 g/100 ml	0,95
Saccharose 140 g/100 ml	0,90
Chlorure de sodium 30 g/100 ml	0,90
BaCl ₂ (saturée)	0,90
Saccharose 205 g/100 ml	0,85
Chlorure de sodium 51 g/100 ml	0,80
NaCl (saturée)	0,75
KI (saturée)	0,67
MgCl ₂ (saturée)	0,33

Tableau 5.5.1
Des solutions avec
une activité de l'eau
connue

5.5.3 Le système HACCP

Garder, et si possible améliorer la qualité des aliments est une tâche très importante mais aussi difficile. La qualité microbienne en particulier est très importante, parce que les maladies d'origine alimentaire sont encore fréquentes. Selon toute apparence, les méthodes traditionnelles utilisées (surveillance des aliments et des opérations, inspection des usines, éducation du personnel) ne permettent pas toujours d'éviter les problèmes. La surveillance des aliments n'est pas suffisante parce qu'il est difficile et coûteux d'analyser un nombre suffisant d'échantillons ; de plus cela prend du temps pour obtenir les résultats. Il semble mieux d'avoir un système capable de prévenir les problèmes. Une telle méthode existe depuis quelques années et il semble que cette méthode donne de bons résultats. La méthode consiste à analyser les risques liés aux points critiques pour leur maîtrise (en Anglais, HACCP = Hazard Analysis of Critical Control Points), soit en d'autres termes l'appréciation des risques liés à la préparation et à la conservation des aliments.

Le système HACCP permet notamment :

- d'identifier les dangers liés à chacun des stades de la production, la transformation et la préparation ;
- d'évaluer les risques correspondants ;
- de déterminer les stades où l'on peut agir efficacement pour éliminer les risques ou les réduire à un niveau tolérable.

Le système HACCP a pour but :

- d'améliorer la sécurité des produits alimentaires et prévenir les maladies transmises par les aliments ;
- de planifier les activités ;

L'HACCP est applicable aussi bien dans les ménages que dans l'industrie ou les restaurants.

Le système HACCP constitue une approche systématique pour recenser, apprécier et supprimer les dangers. Pour cela le système HACCP permet d'inspecter et de surveiller :

- les sources possibles de contamination ;
- les modes de contamination ;
- la probabilité pour que les micro-organismes se multiplient au cours de l'opération de transformation ou de stockage.

Le système HACCP est meilleur par rapport aux autres méthodes telles que le contrôle de qualité classique portant sur le produit final. Le système HACCP est aussi moins coûteux et plus efficace que l'analyse d'échantillons et l'inspection des usines.

Les dangers potentiels doivent être repérés dans les trois domaines suivants :

- les matières premières utilisées ;
- les méthodes de transformation et l'équipement utilisé ;
- le mode d'utilisation du produit final.

La figure 5.5.2 donne un résumé de la méthode HACCP. Ce n'est pas possible de discuter le système HACCP ici en détail ; nous ren-

voyons le lecteur à Bryan (1994). Pour expliquer la figure 5.5.2 nous donnons un exemple : la pasteurisation du lait cru.

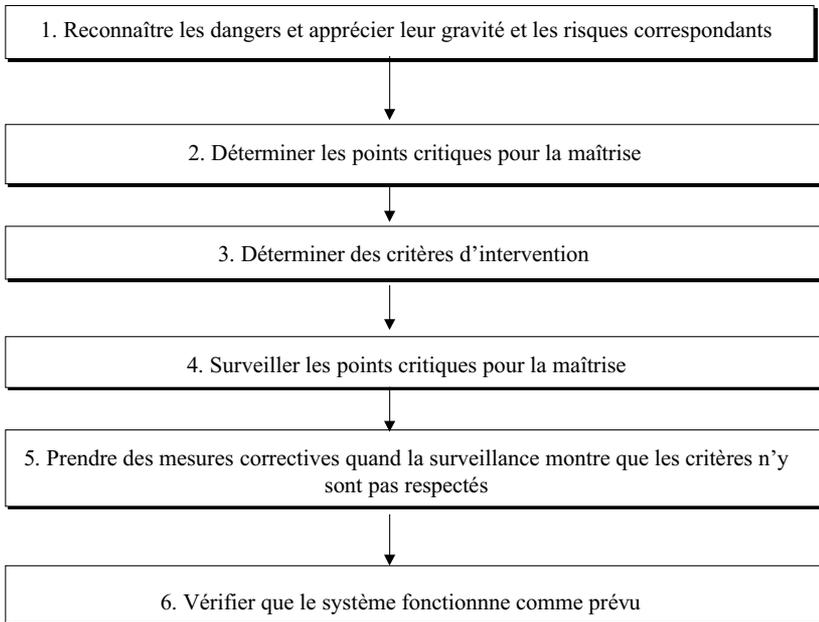


Figure 5.5.2
Les étapes succes-
sives du système
HACCP

Le danger à l'étape no. 1 est de reconnaître la présence, la croissance et la survie de micro-organismes (et ses toxines ou enzymes) pour l'aliment ou la matière première ou ingrédient concerné, la gravité mesure l'importance des conséquences possibles, et le risque estime la probabilité de survenue des dangers. Dans l'exemple du lait cru, les dangers sont les micro-organismes pathogènes (notamment *Salmonella*, *Campylobacter*, et *Mycobacterium tuberculosis*). Le risque est très grand parce que le lait cru peut être dangereux et est le vecteur de la tuberculose.

Un point critique pour la maîtrise (PCM) à l'étape no. 2 est une activité permettant d'agir sur les dangers recensés à l'étape no. 1. Cela peut être une élimination de dangers liés aux microbes, ou bien une réduction au minimum (sans une élimination totale). Dans l'exemple du lait cru, le PCM est la pasteurisation faite de manière que les pathogènes soient éliminés.

Les critères d'intervention à l'étape no. 3 sont des valeurs limites fixées (durée et température dans un procédé thermique, activité de l'eau, pH, etc.). Les critères choisis doivent garantir la suppression des dangers, avec indication de seuil de tolérance. Dans l'exemple du lait cru, les critères sont une combinaison de temps-température à 15 s – 72 °C ; cette combinaison de temps – température assure que le risque est maîtrisé.

La surveillance à l'étape 4 a pour but de vérifier si les critères fixés sont respectés. Dans l'exemple du lait cela veut dire un enregistrement de temps et de température pendant le processus. Il

faut qu'on puisse corriger à temps à l'étape no. 5 si quelque chose n'est pas correcte ; dans l'exemple du lait, on peut encore traiter le lait. La vérification à l'étape no. 6 peut être confiée aux responsables ou à un organisme. Dans l'exemple du lait, la vérification est l'analyse microbiologique ou l'analyse de l'enzyme phosphatase, qui fonctionne comme un indicateur (l'absence de l'activité de phosphatase garantit que les micro-organismes pathogènes sont absents). Il faut souligner que la vérification n'est pas la même chose que la surveillance !

TECHNOLOGIE DES PRODUITS

PRODUITS D'ORIGINE VÉGÉTALE

6.1 Les céréales

6.1.1 Introduction

Les céréales occupent une place de choix dans l'alimentation humaine. Les principales céréales cultivées dans le monde sont :

Le blé tendre (*Triticum aestivum*) ;

Le blé dur (*Triticum durum*) ;

Le riz (*Oryza sativa*) ;

Le mil (*Panicum L.*) et le sorgho (*sorghum*) ;

Le maïs (*Zea mays*).

Dans la sous région ouest-africaine, les céréales locales les plus consommées sont : le maïs, le riz, le mil et le sorgho. Les produits issus de leur transformation constituent l'un des éléments les plus importants du régime alimentaire des populations de l'Afrique Occidentale. Ces céréales et particulièrement le maïs, le mil et le sorgho y sont consommées sous forme de bouillie (koko, akloi, akluiyonu), de pâte (tô, owo, makumè, kafa, akassa), de couscous (yèkè-yèkè, ciéré), de boisson (chakpalo, tchoukoutou ou burkutu, dolo) ou de galettes qui constituent les plats coutumiers de ces régions. Toutes ces préparations traditionnelles sont à base de farine, de semoules plus ou moins grossières obtenues généralement après décorticage et mouture des grains.

Ces produits céréaliers apportent dans la ration alimentaire l'énergie nécessaire et certaines protéines. Ils sont cependant déficitaires en lysine et en vitamines A, C, D. De plus, ils ont une faible teneur en calcium, en fer et en zinc.

Ce chapitre vise à faire de façon succincte le point sur la transformation des céréales dans la sous-région ouest-africaine, en particulier le maïs, le sorgho et le mil. Mais, auparavant, afin de comprendre les mécanismes biochimiques qui entrent en jeu lors de la transformation des céréales, il est nécessaire de connaître les principales caractéristiques des grains.

6.1.2 Caractéristiques des grains de céréales

Il s'agit essentiellement de leur structure et de leur composition.

6.1.2.1 Structure des grains

Le grain comprend 4 parties (cf. figures 6.1.1 et 6.1.2). De l'extérieur vers l'intérieur, on distingue :

Figure 6.1.1
Structure du grain
de maïs

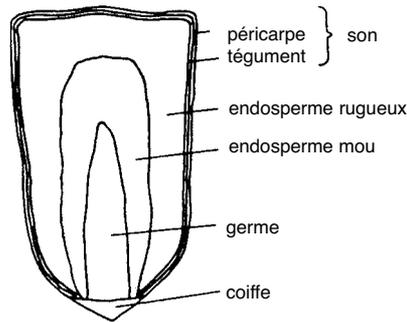
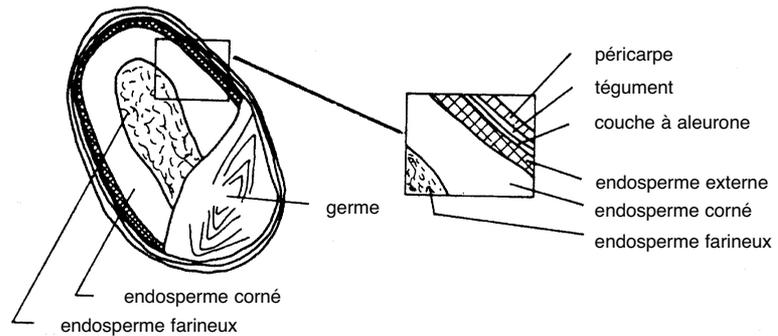


Figure 6.1.2
Structure du grain
de sorgho



Le péricarpe constituant la couche protectrice du grain. Il est riche en sels minéraux et en protéines. Les technologies de transformation entraînent l'élimination de la quasi totalité du péricarpe et par voie de conséquence des pertes non négligeables d'éléments nutritifs contenus dans les débris de sons.

Le tégument encore appelé testa chez le sorgho. Il est riche en composés polyphénoliques (tannins) anti-nutritionnels. Il joue un rôle important dans la défense contre les insectes.

L'endosperme qui se distingue par ses longues cellules rectangulaires qui forment un ensemble compact et qui contiennent des

granules d'amidon et des corps protéiques imbriqués dans la matrice protéique. L'endosperme renferme :

La couche à aleurone : c'est la couche la plus riche en éléments protéiques, vitamines et autres. Dans la transformation des grains de céréales incluant un décorticage, cette couche est aussi enlevée.

L'albumen farineux : il est riche en réserves amylacées et quelques vitamines. C'est une source importante d'énergie pour l'alimentation humaine et animale.

L'embryon ou le germe : c'est la partie la plus riche du grain. C'est là que se concentrent tous les éléments de la plante en miniature.

6.1.2.2 Composition des grains de céréales

Les grains de céréales contiennent :

Eau : 10 à 15 % ;

Glucides, en particulier l'amidon : 70 à 76% ;

Protéines : 8 à 12 % ;

Vitamines du groupe B, PP, pantothénate de calcium ;

Eléments minéraux : potassium, phosphore, magnésium, calcium, fer, zinc ;

Fibres.

La composition en éléments nutritifs du maïs, du sorgho et du mil figure dans le tableau 6.1.1.

Céréales	composition (% base sèche)				
	Amidon	Protéines	Lipides	Fibres	Cendres
Maïs	73	7,4 -12,3	3,7 - 5,8	3,2 - 3,5	1 - 2
Sorgho	71	10,4	3,4	2 - 3,2	2 - 2,6
Mil	69 - 73	10 -11	2,5 - 5	1,5 - 2,1	2,1

Tableau 6.1.1
Composition du maïs, du sorgho et du mil

6.1.3 Les opérations de transformation des céréales

Les opérations de transformation des céréales sont regroupées en 2 grandes étapes qui sont : la première transformation et la deuxième transformation.

6.1.3.1 La première transformation

Elle est précédée d'un certain nombre d'opérations préliminaires.

Les opérations préliminaires

Il s'agit généralement du nettoyage et du triage.

Le nettoyage : Il a pour but d'éliminer les corps étrangers (graviers, débris végétaux...) mélangés aux bons grains. Les principaux matériels de nettoyage des grains de céréales sont les taras et les nettoyeurs/séparateurs. Ces machines sont constituées

de grilles superposées animées d'un mouvement alternatif de translation (secousses) et traversées par un courant d'air.

Le triage : c'est une opération qui permet de calibrer les grains selon leurs dimensions (longueur, largeur, épaisseur), leur densité, leur forme, leur couleur, leur état de surface etc. Il est réalisé avec des appareils appelés trieurs ou calibreurs.

La première transformation proprement dite

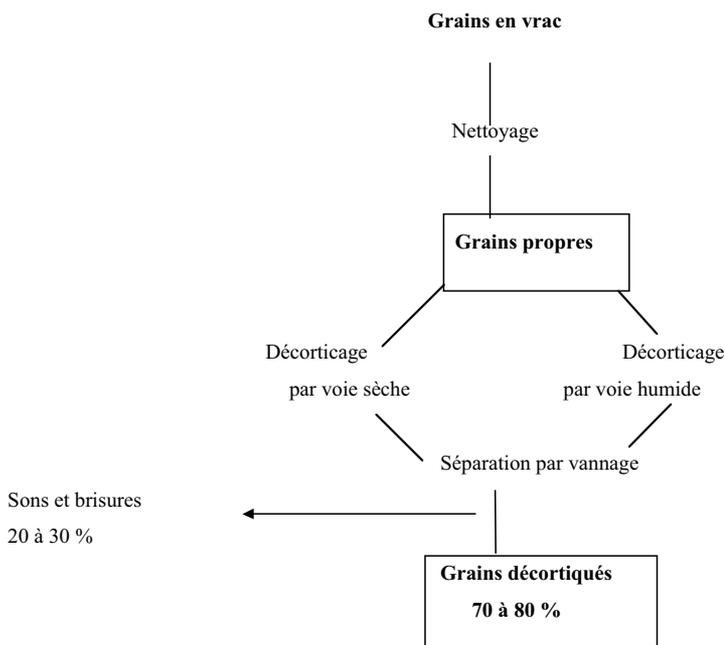
Cette transformation dont le point de départ est le grain entier comprend les opérations de décortiquage et de mouture.

Le décortiquage : Il consiste à enlever le péricarpe du grain, riche en fibres indigestes. Selon la structure du grain et la force du décortiquage, tout ou une partie du germe peut être éliminé.

Le décortiquage du sorgho et du mil

Le décortiquage traditionnel du sorgho se fait par pilage du grain préalablement nettoyé et éventuellement modifié (5% d'eau) pour rendre plus souples les téguments et faciliter le dépelliculage. Ce décortiquage peut être schématisé comme montré par la figure 6.1.3.

Figure 6.1.3
Le décortiquage traditionnel du sorgho



Le décortiquage du mil et du sorgho par la technologie intermédiaire est peu répandu en Afrique de l'ouest. Le retard pris dans la mécanisation du décortiquage de ces deux céréales s'explique par les problèmes de mise au point et par le fait que la mouture, plus pénible pour les femmes, a été mécanisée en priorité.

Les difficultés posées par le décortilage mécanique du mil et du sorgho sont :

- Hétérogénéité de la taille des grains ;
- Présence de hile et de téguments colorés qui nuisent à l'acceptabilité des produits finis ;
- Friabilité des enveloppes qui facilite leur pulvérisation et complique par la suite leur élimination ;
- Présence de testa difficile à éliminer et riche en polyphénols préjudiciables à la qualité des produits finis.
- Élimination du péricarpe entraînant une perte de 20 à 25% en poids ;

Il existe deux procédés de décortilage mécanique :

- La voie humide qui consiste à ajouter 0,5 kg d'eau pour 10 kg de grains, amenant l'humidité à environ 15 %. Cette opération réduit la pénibilité du décortilage mais les grains décortiqués se conservent mal et sont généralement moulus immédiatement en vue d'une consommation rapide.
- La voie sèche qui consiste à faire frotter le grain sur des surfaces abrasives montées sur un rotor.

Le décortilage industriel du mil et du sorgho devrait éliminer par abrasion ou par attrition la totalité du péricarpe y compris la testa souvent fortement colorée par les anthocyanes. Mais, il ne devrait pas éliminer la couche à aleurone située immédiatement sous la testa à la périphérie de l'albumen.

Une technique consiste à humidifier rapidement le grain pour décoller légèrement le péricarpe au niveau de l'endosperme, puis à le passer dans un moulin à cylindres cannelés. Les sons sont séparés des semoules et des farines. Mais les enveloppes du sorgho se séparent difficilement de l'amande contrairement au blé.

Le décortilage du maïs

Le décortilage traditionnel du maïs a pour but d'enlever le péricarpe mais surtout le germe qui, du fait de sa richesse en lipides risque d'altérer les qualités organoleptiques des produits finaux (farine, bière).

Le décortilage traditionnel du maïs comprend trois étapes :

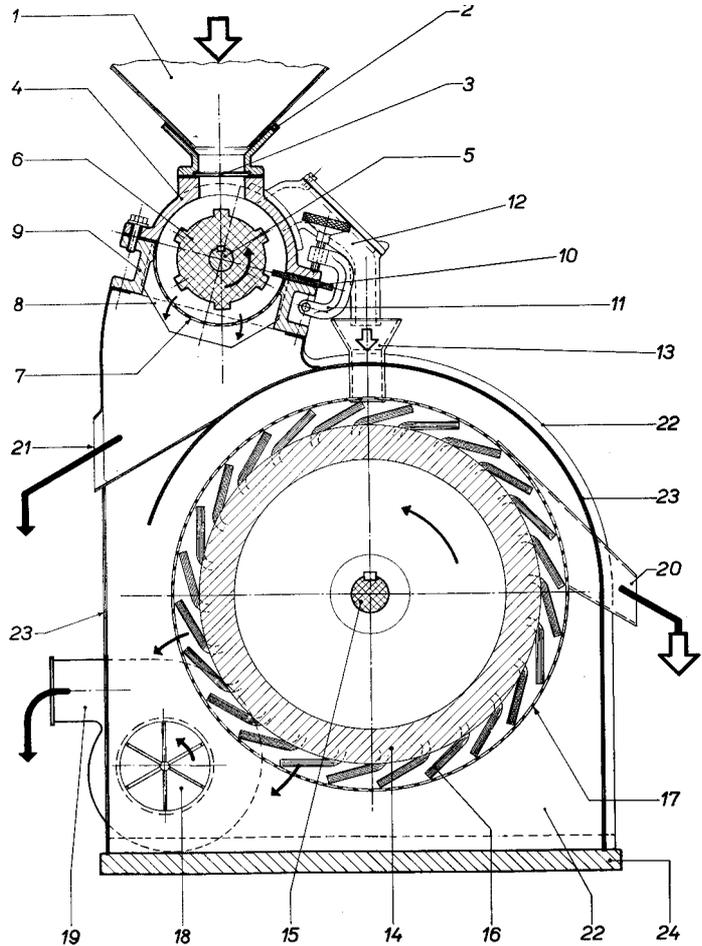
- Le mouillage du grain par trempage rapide ou aspersion d'eau dans le mortier ou la meule. La teneur en eau est amenée à 25 – 30 % ;
- Le décortilage au mortier ou à la meule avec élimination du germe ;
- Le vannage pour éliminer le son.

Le décortilage/dégermage mécanique du maïs est effectué artisanalement avec des machines utilisées pour le blanchiment du riz (Figure 6.1.4). Les pertes au décortilage sont élevées du fait des brisures. Le décortiqueur PRL (Figure 6.1.5) à disques résinoïdes effectue un dégermage partiel du produit. Il n'est donc pas toujours recommandé pour l'équipement des mini-maïzeries qui doi-

vent respecter certaines normes de qualité pour écouler leurs produits sur le marché (grits devant contenir moins de 0,5% de lipides).

Figure 6.1.4
Machine à blanchir à friction

- 1: Trémis d'alimentation;
- 2: Volet de réglage de l'alimentation;
- 3: Volant à main de réglage de l'alimentation;
- 4: Vis d'alimentation;
- 5: Cylindre à came en fonte dure;
- 6: Ouvertures d'air de l'arbre creux;
- 7: Tamis métallique hexagonal;
- 8: Cage hexagonale du tamis;
- 9: Levier de contre-poids;
- 10: Contre-poids;
- 11: Evacuation du riz;
- 12: Arbre creux;
- 13: Poulie d'entraînement;
- 14: Courroie d'entraînement;
- 15: Ventilateur;
- 16: Moteur du ventilateur;
- 17: Socle;
- 18: Paliers;
- 19: Fentes de circulation d'air du cylindre;
- 20: Evacuation des issues.



En Amérique latine et particulièrement au Mexique et en Amérique centrale, un décortiquage du maïs par voie chimique est couramment pratiqué : il s'agit de la « nixtamalisation ». Les grains de maïs sont cuits quelques heures dans une solution alcaline (eau saturée en chaux). Au cours de cette scission alcaline, une fraction importante des composés pariétaux, du péricarpe est solubilisée. Le péricarpe devient alors fragile et délitescent. Il est ainsi facilement éliminé par simple frottement des grains les uns sur les autres au cours de l'étape du rinçage ; On obtient ainsi le nixtamal, qui est un grain précuit complètement décortiqué mais non dégermé. Les pertes au décortiquage sont faibles : 8 – 17 %.

Au point de vue nutritionnel, le procédé de nixtamalisation est doublement positif puisqu'il permet en outre de transformer la niacine sous sa forme assimilable.

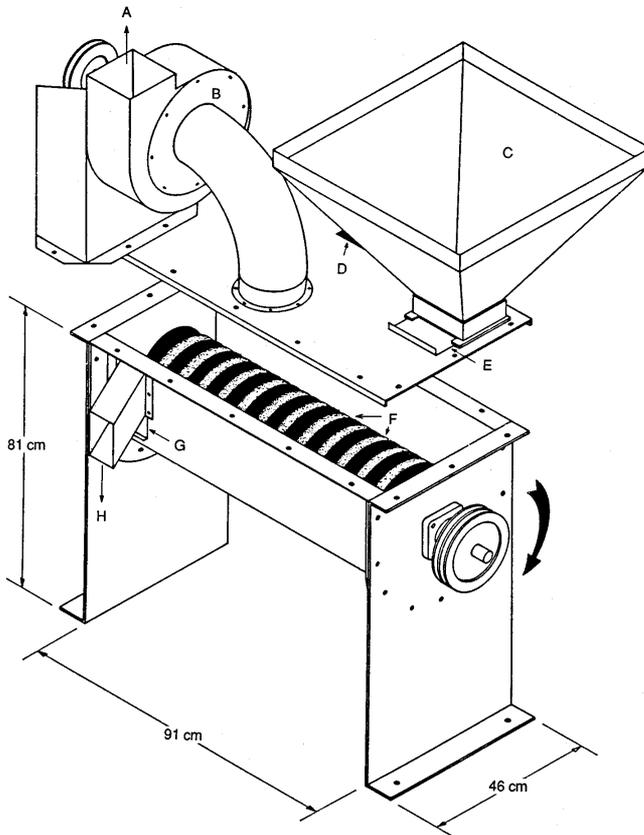


Figure 6.1.5
Décortiqueur PRL

Le décortiquage industriel du maïs : comme pour les deux premières technologies, le germe doit être éliminé dans la transformation industrielle si l'on veut éviter un rancissement rapide de la farine. On distingue 2 types de décortiquage industriel :

- la voie humide où le maïs est porté à 15 –16% d'humidité avant dégermage. Le taux de matières grasses final est inférieur à 1%.
- La voie sèche où aucun traitement préalable n'est requis et le maïs est dégermé à 12 –14% d'humidité.

Le dégermage industriel ne pose pas de problèmes d'ordre technologique.

La mouture et le broyage :

Les opérations de mouture et broyage conduisent à la préparation des semoules ou de farines avec ou sans issues (enveloppes et sons). C'est sous cette forme que les céréales sont converties pour servir de base aux plats traditionnels ou nouveaux. Lorsque l'on réalise une semoule grossière, on parle généralement de broyage alors que pour la fabrication de farine fine, on parlera de mouture.

La technologie traditionnelle de mouture des céréales la plus répandue, reste le pilonnage au mortier ou à l'aide de meules dormantes. Les grains décortiqués sont trempés 1 à 24 heures. Le grain a alors une humidité comprise entre 22 et 26%. Il s'ensuit une homogénéisation et humidification à l'intérieur du grain. Les femmes impriment au pilon, non seulement un mouvement vertical, mais aussi un mouvement transversal obtenu par percussion des parois latérales du mortier. Le pilonnage est interrompu par plusieurs tamisages.

Technologie intermédiaire : en milieu rural comme en milieu urbain, on assiste au développement de la mécanisation de la mouture grâce à l'introduction de petits moulins motorisés et polyvalents (sorgho, mil, maïs). Ces moulins peuvent être classés en deux catégories :

- Les moulins à meules ou à disques qui sont les plus indiqués pour les moutures par voie humide. Ils sont toutefois polyvalents et peuvent moudre indifféremment les produits secs et humides. Pour cette raison, les moulins à meules sont les plus répandus en Afrique de l'Ouest. ;
- Les moulins à marteaux qui théoriquement, ne peuvent écraser que du grain sec. Sinon, on observe un colmatage de la grille de sortie. Une augmentation de 1% du taux d'humidité des grains entraîne une diminution du débit de 10%.

Technologie industrielle : toutes les opérations pour obtenir la farine sont mécanisées. On peut considérer qu'une minoterie est de type industriel lorsque sa capacité de traitement dépasse 30 tonnes par jour.

Les produits marchands issus de la première transformation

Il existe toute une gamme de produits de première transformation selon les technologies employées. En Afrique occidentale, on distingue 2 principaux types de produits de première transformation : les produits issus d'une mouture sèche ou semi-humide et qui sont peu ou pas fermentés (les grains décortiqués, les farines et les semoules) et les pâtes fermentées (principalement le *mawè* et l'*o-gui*) qui sont obtenues par mouture humide du grain entier ou décortiqué.

Les produits artisanaux : ce sont les grains décortiqués, les semoules, le couscous et les farines infantiles.

- *Les grains décortiqués* qui sont surtout commercialisés à Bamako (Mali) et à Abidjan (Côte d'Ivoire). Les grains sont décortiqués à l'aide d'un décortiqueur Engelberg.
- *Les semoules* : à Abidjan, les détaillants commercialisent de grosses semoules obtenues par simple concassage des grains de maïs décortiqués au moulin. Au Mali, il s'agit d'une production complexe effectuée par des femmes à Bamako. Les grains sont décortiqués à l'aide d'un décortiqueur Engelberg, vannés puis broyés au moulin. Le produit subit deux tamisa-

ges successifs. La farine est écartée tandis que les fines et grosses semoules sont lavées, séchées et vendues.

- Le couscous : le **yèkè-yèkè** est un couscous obtenu après cuisson à la vapeur du **mawè** non fermenté et roulé. C'est un produit typique du Bénin et du Togo.
- Les farines : ce sont des farines séchées de maïs blanc et de sorgho. Elles sont obtenues par :
 - Décorticage à l'aide d'un appareil Engelberg ;
 - Trempage du grain décortiqué ;
 - Broyage au moulin à disques ;
 - Séchage de la farine avant la vente.
- *Les farines de sevrage* : Les aliments de sevrage trouvent leur place dans l'alimentation du nourrisson entre le lait maternel exclusif et une nourriture de type adulte. Pour répondre aux besoins de l'enfant, un aliment de sevrage doit être :
 - Une bouillie ou une purée : l'aliment doit être facile à manger pour que l'enfant ne le refuse pas ;
 - Un aliment très nourrissant : beaucoup de mères pensent que plus un aliment est épais, plus il est nourrissant pour le bébé. C'est une erreur. La qualité de l'aliment ne dépend pas de sa consistance, mais de sa teneur en énergie;
 - Un aliment équilibré : Pour que sa croissance soit harmonieuse, l'enfant a besoin de plusieurs nutriments : des aliments énergétiques (sucres ou glucides, matières grasses ou lipides), des aliments constructeurs (protéines), des aliments protecteurs (vitamines et sels minéraux). L'aliment de sevrage doit contenir dans de bonnes proportions tous ces éléments ; En pratique, il est composé de céréales que l'on enrichit avec des protéines animales (lait) ou végétales (légumineuses), des matières grasses et des fruits frais.
 - Un aliment digeste : l'alimentation adulte ne convient pas à l'enfant dont le tube digestif n'est pas encore capable de tout digérer et absorber. L'aliment de sevrage subit donc une préparation spéciale qui le rend plus facile à assimiler (prédigestion). Le grillage permet de détruire les facteurs antitrypsiques qui empêchent les enzymes de décomposer les protéines des aliments. Le grillage permet également une précuisson et la dégradation partielle de l'amidon. La mouture permet d'éliminer les morceaux et d'obtenir une farine très fine. Le tamisage permet de retirer certaines fibres non digestes. La cuisson rend les molécules constitutives de l'amidon sensibles aux enzymes digestives.
 - Un aliment sain : on utilise pour préparer les farines, des produits sains, et l'on élimine notamment tous les produits toxiques (moisissures pouvant sécréter des mycotoxines, matières premières traitées contre les insectes et qui contiennent encore des pesticides etc.).

Dans plusieurs pays africains, des farines infantiles présentant toutes les caractéristiques citées ci-dessus ont été élaborées. On peut citer :

La farine Misola au Burkina Faso : elle est composée de petit mil (60%), de soja (20%), d'arachide (10%) de sucre (9%) et de sel (1%) ;

La farine vitafort au Congo : elle est composée de farine de manioc (43,4%), de farine de maïs (30%) de farine de soja (18,6%) de sucre (8%) et de 32 mg de BAN 800 MG pour 100 g de matière brute. Le BAN 800 MG est une enzyme mise au point par les chercheurs de l'IRD (ex ORSTOM) au Congo, qui permet d'agir sur l'amidon en limitant son gonflement au moment de la préparation de la bouillie et de réduire sa viscosité ;

Les farines de OUANDO au Bénin à base de riz, de maïs et de lait (Rimalait) ou de céréales et de soja avec enrichissement en vitamines (Cereso).

Les produits industriels et semi-industriels : on distingue les farines, les semoules, les pâtes fermentées et l'amidon.

- *Les semoules et les farines* : au Sénégal et au Mali sont installées des mini-minoteries villageoises qui sont équipées de décortiqueurs à disques abrasifs et de broyeurs à meules ou à marteaux. Ces unités sont destinées à produire des semoules et farines de maïs vendues sur le marché local et urbain. Si les semoules se vendent bien, on observe en revanche un problème de qualité de la farine. Celle-ci n'est pas adaptée à la fabrication du tô.

Il existe par ailleurs une unité semi-industrielle pour la production de grits par mouture semi-humide sur cylindres. Les consommateurs reprochent à ces produits un manque de purification, la présence de sons (arrière goût désagréable) et de lipides (mauvaise conservation).

- *Les pâtes fermentées* : dans les pays du Golfe du Bénin et à Cotonou en particulier, près de 50 % du maïs est broyé sous forme humide afin de donner des pâtes fermentées appelées **mawè** et **ogui**. Ces pâtes sont utilisées pour la confection de nombreux plats.

Le **mawè** destiné à la vente est obtenu après une étape de broyage et une étape de mouture fine, séparées par un tamisage et un lavage des produits. Il s'agit d'un produit raffiné (pauvre en lipides, fibres et cendres), humide (46 à 48% d'eau), et qui a subi une fermentation de type lactique.

- *L'amidon* : l'extraction de l'amidon est l'un des principaux débouchés du maïs dans les pays développés.

L'amidon est extrait de l'albumen après broyage du grain en milieu humide. Pour faciliter l'extraction et la séparation des différents constituants, le grain est mis à tremper pendant plusieurs heures à 50 °C environ dans une solution aqueuse enrichie en SO₂ et en acide lactique. Le germe et le péricarpe

deviennent élastiques tandis que l'albumen devient friable. L'attaque chimique par le SO_2 et l'acide lactique facilite par ailleurs la libération de l'amidon. Le grain est ensuite soumis à une succession de broyage et de tamisage. L'amidon est extrait, purifié par centrifugation puis séché.

6.1.3.2 La seconde transformation

La seconde transformation met en œuvre des farines et des semoules pour fabriquer des aliments prêts à consommer ou des produits de cuisson et de préparation rapides.

Les opérations de seconde transformation

La cuisson : pour les céréales, elle se traduit d'abord par des modifications (importantes et favorables) de leurs qualités organoleptiques (saveur, couleur...). Les réactions chimiques qui se produisent au cours de leur cuisson sont nombreuses et complexes. Il apparaît souvent des composés aromatiques et la texture de certains composants comme les protéines, l'amidon ou encore les fibres est profondément modifiée.

Le maltage : Il consiste à faire germer le grain jusqu'à l'apparition d'une pousse. En général le grain est trempé pendant 16 à 24 h, ce qui lui permet d'absorber suffisamment d'humidité pour germer et pour que les pousses apparaissent.

Au cours du processus de germination, le grain produit l'amylase, une enzyme qui convertit l'amidon insoluble en sucres solubles. Cela a pour effet d'alléger la pâte produite en chauffant une bouillie d'amidon dans l'eau, ce qui a son tour permet une plus grande densité calorifique dans une pâte d'une viscosité donnée. Ainsi, on peut utiliser jusqu'à 3 fois plus de farine quand on utilise du grain germé. L'énergie que les jeunes enfants peuvent consommer est souvent limitée par le volume qu'ils peuvent absorber. Mais en utilisant le grain germé, on peut rendre les aliments mieux adaptés à certaines catégories de jeunes enfants. La farine à base de grain malté est donc utilisée très largement dans la production d'aliments pour enfants.

Mais lorsque ces aliments sont préparés à partir du sorgho, il faut faire très attention au taux de l'HCN, car les enfants y sont vulnérables. En effet, les radicules et les pousses du sorgho germé contiennent de très grandes quantités de glucosides cyanogènes qui, à l'hydrolyse, produisent une toxine puissante, l'HCN connue sous différents noms : acide prussique, cyanure.

La fermentation alcoolique : bien que les boissons ne soient pas des aliments majeurs, elles constituent dans plusieurs pays une source d'énergie non négligeable.

Les porridges fermentés fluides sont généralement préparés et utilisés comme boisson. On les considère comme des aliments et ils apportent d'importants éléments nutritifs.

La bière est une source de vitamine, de matière grasse et de sels

minéraux (Fe, Mg, Mn, P et Ca). Elle contient 26,7 g de glucides et 5 g de protéines par litre.

Les produits marchands issus de la deuxième transformation

Les produits traditionnels artisanaux : en Afrique de l'Ouest, les produits les plus consommés sont les bouillies et les pâtes cuites, fermentées ou non. On peut toutefois classer les pays d'Afrique de l'Ouest en deux catégories : les pays sahéliens où le mil et le sorgho sont transformés en **tô** ou en boissons et les pays du Golfe du Bénin, où les utilisations du maïs sont très développées et très variées. On a ainsi dénombré une quarantaine de recettes à base de maïs au Bénin. On distingue les produits de base (**akassa, aklui...**), des produits de grignotage (beignets...) et des boissons alcoolisées ou non (**chakpalo, sodabi, akpan ...**).

• *Les pâtes* : on peut trouver les pâtes à base de céréales suivantes :

Le tô : C'est une pâte cuite à l'eau à partir de la farine de sorgho ou de mil. Cette pâte est surtout consommée dans les zones sahéliennes ;

L'owo : c'est une pâte cuite à l'eau à partir de la farine entière non fermentée de maïs.

L'akassa : Il s'agit d'une pâte préparée à partir du **mawè** ou du **ogui** (pâtes fermentées de farines de maïs).

Dans le cas du maïs, du sorgho et du mil, selon la granulométrie de la farine, pour une même variété de céréale, le **tô**, **owo**, etc... peut être de très bonne ou de très mauvaise qualité. Les farines très fines <150 µm donnent un bon **tô**, contrairement à la farine grossière.

Les farines ayant un taux d'amidon endommagé élevé au cours de la mouture donnent un **tô** ferme par rapport aux farines contenant des particules grossières et un faible taux d'amidon endommagé.

• *Les pains et les galettes* : on peut citer :

L'ablo : C'est un pain préparé à partir du **mawè**. Ce dernier est soumis à une fermentation de type panaire (avec ajout de levure) avant d'être cuit à la vapeur sous forme de boulettes enveloppées d'emballages végétaux ou plastiques. **L'ablo** cuit présente une structure alvéolaire régulière et est consommé comme les autres pâtes. Les difficultés de réalisation d'**ablo** font que les productrices ont tendance à substituer la farine de riz au **mawè** ;

Le klaklu : C'est un beignet obtenu après friture d'une pâte faite de grains de maïs torrifiés, broyés et assaisonnés de divers condiments. Il est produit au Bénin ;

Le wainna : Il s'agit d'un beignet consommé au Cameroun et obtenu après friture d'une pâte faite de farine de maïs, de manioc et d'écorce, de sel, et de sucre.

- *Les bouillies* : l'**aklui** au Bénin, le **moni** au Mali ou l'**arraw** au Sénégal sont des bouillies parsemées de granules. L'aklui par exemple est fabriqué à partir du mawè par granulation de ce dernier puis cuisson dans l'eau bouillante.
- *Les boissons* : il existe plusieurs boissons à base de céréales en Afrique de l'Ouest. Nous pouvons citer :
 - Le dolo** qui est une boisson fermentée à base de sorgho ou de mil ;
 - Le chakpalo** : bière légèrement sucrée, de couleur brune dont la préparation s'effectue en plusieurs étapes : maltage du maïs (trempage, germination et séchage pendant 6 ou 7 jours), concassage, brassage (humectage, pétrissage, délayage dans l'eau de cuisson de la farine), filtration du mélange et fermentation du filtrat ;
 - Le tchoukoutou** : autre forme de bière préparée à partir du sorgho ou du mil ;
 - Le sodabi** : eau de vie originellement obtenue par distillation du vin de palme fermenté. Du fait de la chute de la production de ce vin, d'autres types de moûts comme celui à base de maïs sont actuellement utilisés pour la préparation du **sodabi**.

Les produits industriels ou semi-industriels

- *Le pain et les pâtes alimentaires* : en Afrique, la substitution partielle du blé pour la fabrication de pain et de pâtes alimentaires a été la principale voie de recherche étudiée pour la valorisation des céréales locales. Cette voie nécessite l'utilisation de farine de céréales locales, produite par mouture sèche en éliminant les matières grasses du germe et les fibres du péricarpe, et ayant par ailleurs une granulométrie inférieure à 180 micromètres.
Pour la panification, le taux de substitution à la farine de blé peut alors atteindre 15 à 20%, avec parfois quelques modifications du procédé de panification comme l'ajout d'additifs variés (monoglycérides, farine de soja, matières grasses solides, etc.) ou un pétrissage séparé et/ou intensifié.
Pour la pastification, le taux de substitution peut atteindre 50 %, moyennant une adaptation du procédé de pastification. Cependant, à l'heure actuelle, ces deux filières ne sont plus utilisées pour la valorisation des céréales locales, du fait, en particulier, d'un rejet des produits par les consommateurs.
- *La brasserie* : Le marché de la brasserie représente 5 % du marché du maïs en Côte d'Ivoire et près de 10 % au Cameroun.
Les brasseries industrielles, présentes dans la plupart des pays d'Afrique de l'Ouest, utilisent en partie du maïs (environ 30 %) sous forme de grits, dont elles exigent une teneur en lipides inférieure à 1 %, nécessitant ainsi un dégermage poussé du grain de maïs. Au vu de cette qualité recherchée,

elles ne peuvent s'approvisionner qu'auprès des maïseries industrielles locales ou sur le marché international. Il faut toutefois noter qu'il est parfaitement possible de produire une bière de qualité (et qui se conserve six semaines sans dégradation notable) avec des semoules de maïs entier contenant plus de 4 % de lipides, si cette matière première est utilisée rapidement après sa fabrication, afin d'éviter la formation d'acides gras qui modifieraient le goût de la bière. On préconise ainsi des unités industrielles intégrées produisant les semoules de maïs au fur et à mesure de leur utilisation en brasserie.

A la suite de la prohibition du malt d'orge en 1988, l'industrie de la brasserie du Nigeria a utilisé du sorgho et du maïs comme matière première pour la production de la bière blonde. Les variétés de sorgho utilisées par les brasseurs nigériens sont le SK 5912 et farafara. Contrairement au malt d'orge, le malt de sorgho a de faibles teneurs en β -amylases et d'autres enzymes nécessaires. Cependant les résultats obtenus de façon empirique par incorporation d'enzymes exogènes sont encourageants.

- *Les farines infantiles, les biscuits et le couscous* : ces utilisations industrielles du maïs, sont peu ou pas pratiquées, sauf au Nigeria, où il existe plusieurs types de bouillies infantiles produites industriellement.

La fabrication industrielle de biscuits à base de maïs et de couscous de maïs ne présente pas de difficultés techniques majeures.

6.2 La rizerie

6.2.1 Introduction

Le produit obtenu par le riziculteur n'est pas directement utilisable pour la consommation humaine; le grain est revêtu de ses enveloppes (ou balles) serties l'une contre l'autre, constituant le paddy. Le grain de riz doit être extrait par décorticage des balles qui l'enveloppent hermétiquement et que le battage n'a pu séparer; par cette opération on obtient du riz décortiqué et un sous-produit, les balles. En outre, un certain pourcentage des grains de paddy est brisé et des particules légères sont détachées lors du décorticage ; les petites brisures et les particules très fines de balles et de grains constituent le son (auquel sont mélangés en grand nombre des germes détachés lors du décorticage). Commercialement, le riz décortiqué, tel qu'il sort du décortiqueur est appelé riz cargo. Le riz cargo renferme toujours une petite quantité de paddy qui a échappé au décorticage. Après décorticage, le riz décortiqué est soumis au blanchiment, qui a pour but d'enlever de la surface du grain de riz décortiqué, de l'extérieur vers l'intérieur, les différentes couches du péricarpe et la couche à aleurone. On obtient

ainsi le riz blanc et un sous-produit pulvérulent, les issues. Au cours des opérations de blanchiment, des grains se fragmentent en proportion plus ou moins élevée, produisant des brisures de divers calibres. Enfin, le riz blanchi peut subir un polissage ou même un glacage, opérations ultérieures destinées à améliorer la présentation du riz.

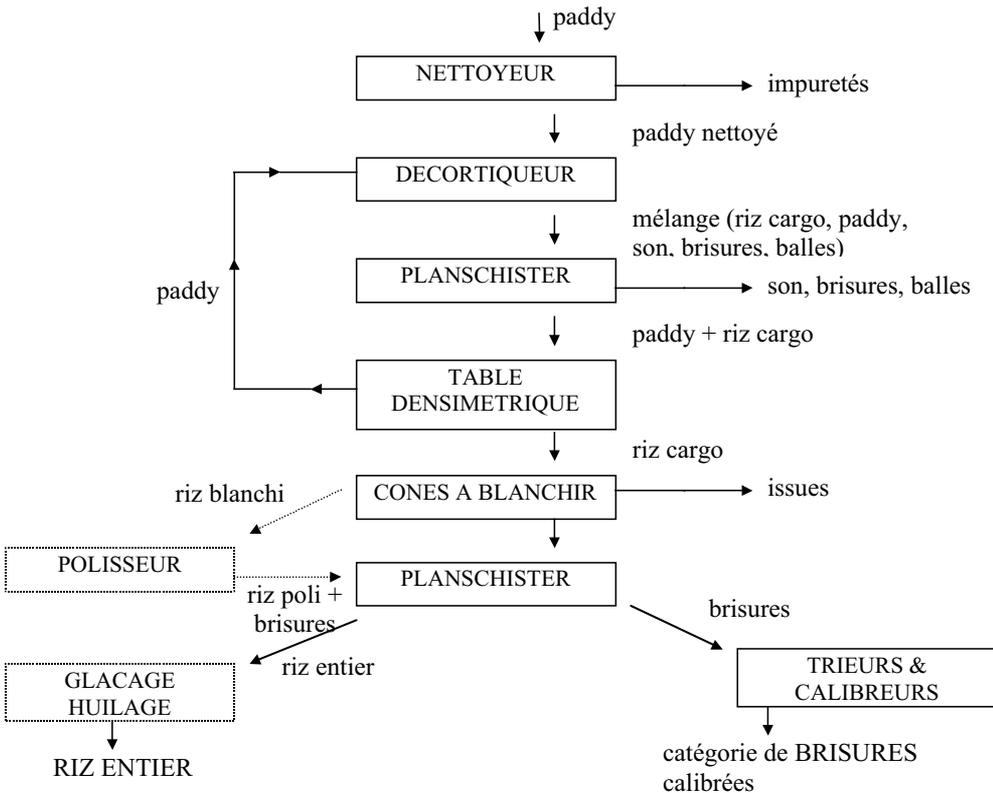
6.2.2 Nettoyage du paddy

Le nettoyage se fait à l'aide de tarares, c'est-à-dire des appareils à cribles plans et à secousses. Ils sont placés à l'entrée des silos de stockage ou en tête des opérations d'usinage, avant les décortiqueurs ou les classeurs à paddy. Les tarares sont à 2 ou 3 cribles ; ils possèdent une soufflerie créant un courant d'air agissant sur le paddy à son entrée sur le tarare et à sa sortie après son nettoyage par les cribles. Le ou les deux cribles supérieurs retiennent les impuretés de grandes dimensions; le paddy propre est retenu par le crible inférieur au travers duquel passent les petites impuretés.

6.2.3 Diagramme d'usinage

La figure 6.2.1 présente un diagramme de transformation montrant les étapes majeures et les produits intermédiaires.

Figure 6.2.1
Schéma d'une rizerie



6.2.4 Décortiquage

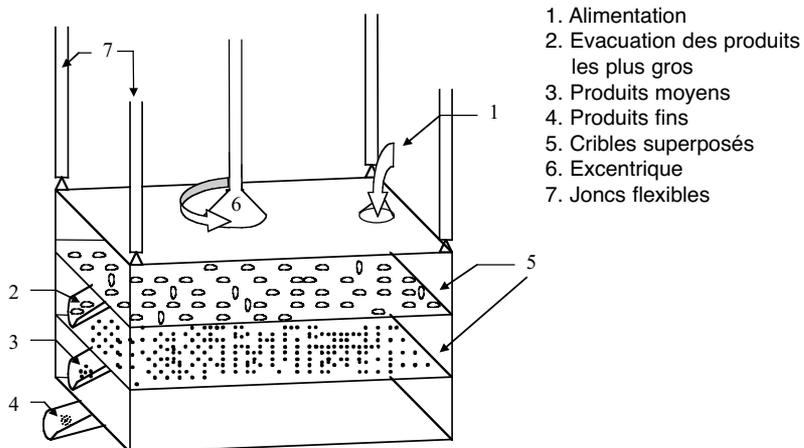
L'appareil le plus répandu est le décortiqueur à meules ; il est essentiellement composé d'une meule fixe supérieure (meule gisante) sous laquelle tourne dans un plan horizontal une meule inférieure (meule courante). Chaque meule est constituée d'un disque en fonte, les deux faces se faisant vis-à-vis étant recouvertes d'une substance abrasive appliquée en couches bien uniformes. Le paddy est introduit par une lumière ménagée au centre de la meule supérieure et se répand entre les deux meules. Par friction et pression sur les deux extrémités des grains, ceux-ci sont débarrassés de leurs balles. Le mélange riz décortiqué, balles, sons et brisures est évacué par une goulotte débouchant latéralement de la partie inférieure du carter du décortiqueur.

Tableau 6.2.1
Taux normaux de brisures des appareils à meules

	Brisures (%) du cargo	Brisures (%) du paddy effectivement usiné
Grains de format rond	5,5 - 11,4	4,14 - 8,05
Grains demi-longs	12,3	8,7
Grains très longs	15	11,1

On juge de l'efficacité du décortiquage par son rendement en riz cargo (grains entiers ou de dimensions supérieures à trois quarts de grain + brisures). La meule ne permet que rarement, et dans les meilleures conditions, d'obtenir un rendement en cargo supérieur à 75 % (du paddy), dont au minimum 4 % de brisures (Tableau 6.2.1). Le réglage, l'entretien et le rhabillage des meules (avec le mélange abrasif) sont délicats et demandent l'intervention de spécialistes. Le rendement maximum en riz cargo et le taux minimum de brisures ne peuvent de toute façon être obtenus que si les lots de paddy à décortiquer sont homogènes, exactement d'un même format et de même longueur. Aucun réglage ne peut compenser l'hétérogénéité des lots de paddy à usiner.

Figure 6.2.2
Planschister



6.2.5 Planchister

Les planchisters sont constitués par des cribles horizontaux superposés qui sont suspendus à des joncs flexibles, l'ensemble étant animé d'un mouvement circulaire horizontal par un excentrique mu par un axe rotatif vertical (Figure 6.2.2).

6.2.6 Table densimétrique

Le séparateur à paddy ou table densimétrique (Figure 6.2.3) se compose essentiellement d'un plan métallique incliné, de forme rectangulaire, et animé de mouvements alternatifs longitudinaux. Sur ce plan se trouvent des chicanes de tôle dont l'arête médiane est dirigée vers la partie supérieure. Le mélange riz décortiqué + paddy est envoyé au milieu du plan ; le riz décortiqué, plus dense, descend le plan au travers des chicanes. Par contre, le paddy, plus léger et plus élastique, rebondit sur les chicanes et remonte la pente du plan pour sortir par le haut.

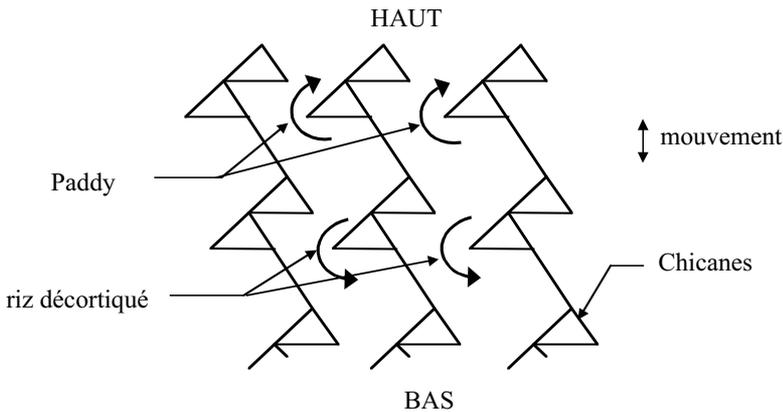


Figure 6.2.3
Table densimétrique
vue d'en haut

6.2.7 Blanchiment par cônes à blanchir

Ce type d'appareil (Figure 6.2.4) se compose essentiellement d'un tronc de cône métallique revêtu d'une couche abrasive ; ce tronc tourne à l'intérieur d'une enceinte de même forme que le tronc de cône, mais légèrement plus grande. Cette enceinte est constituée d'une toile métallique ou de tôle perforée. Le riz décortiqué est

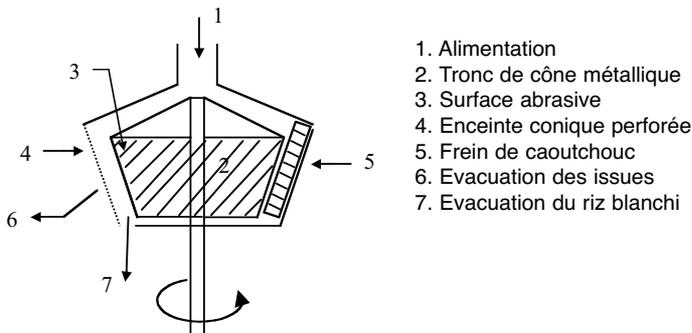


Figure 6.2.4
Cône à blanchir

introduit par la partie supérieure entre le tronc de cône et l'enceinte. Le riz se dispose dès lors en anneaux plus ou moins larges et tourne avec le tronc de cône. Le blanchiment résulte du frottement des grains les uns contre les autres et du frottement contre la surface abrasive, mais afin d'éviter que les grains ne soient entraînés dans un mouvement de rotation sans fin, des freins en caoutchouc sont fixés sur les bords latéraux de l'enceinte et sortent de l'enceinte en direction de la surface abrasive du tronc de cône. La distance entre le frein et la surface abrasive doit être telle que la masse des grains soit freinée tout en permettant à ceux-ci de passer. Le blanchiment optimum, aboutissant à une blancheur optimale du grain, est obtenu par élimination, aussi modérée que possible, des issues (farines basses de blanchiment) et par l'obtention du taux le plus élevé possible de grains entiers (ou le taux le plus faible possible de brisures), tout en maintenant un débit horaire normal. Le blanchiment complet est obtenu dès que l'albumen est mis à nu, donc après l'élimination des téguments et de la couche à aleurone du caryopse.

Le taux d'extraction total doit être compris entre 5,5 % et 9 % pour obtenir un blanchiment satisfaisant (6 à 8 % en moyenne), et 9 à 9,5 % pour un blanchiment absolument complet; mais seulement 3 à 4 % pour un semi-blanchiment.

6.2.8 Polissage, glaçage, huilage

Le riz simplement blanchi a un aspect mat ; il reste légèrement saupoudré de farine. On peut simplement le brosser avec des brosses en tampico ou en feutre, permettant d'obtenir le riz "fleur". Industriellement, on le polit dans un cône polisseur semblable au cône à blanchir, mais dont la toupie tronconique est garnie de peau de mouton ou de flanelle et dont l'enceinte perforée est en toile métallique constituée de fils ronds et non carrés.

Le glaçage consiste en un enrobage des grains avec une suspension de talc dans une solution de glucose. Ce glaçage n'est pratiquement réalisé que pour le riz de luxe.

Dans certains pays, en Italie notamment, le riz poli subit un très léger enrobage d'huile.

6.2.9 Étuvage

Au cours du blanchiment, l'élimination des couches périphériques du caryopse entraîne la disparition plus ou moins complète de nombreux éléments nutritifs (lipides), d'éléments minéraux (calcium et surtout magnésium, potassium, phosphore et fer), et de diverses vitamines. On a dû chercher une technique permettant de conserver, malgré le blanchiment, la teneur initiale ou tout au moins des teneurs élevées en ces éléments, et ce, particulièrement pour les vitamines. Pour soustraire les vitamines à l'action du blanchiment, il suffit de les faire diffuser vers l'intérieur du grain. Cette diffusion est obtenue par l'opération dite "d'étuvage", qui

consiste essentiellement en un trempage du paddy suivi d'une élévation de température puis d'un séchage. Le paddy est ensuite usiné comme un paddy ordinaire. Au cours de l'usinage, et plus spécialement du blanchiment, les pertes en vitamines hydrosolubles sont beaucoup moins importantes avec le riz étuvé qu'avec le riz ordinaire : pratiquement pas de pertes de niacine, tandis que les teneurs en vitamines B1 sont doubles, et celles en vitamines B2 supérieures de 30 à 50 % à celles obtenues sans étuvage.

Outre la diffusion des vitamines hydrosolubles du péricarpe vers l'intérieur de l'albumen, un certain nombre de phénomènes physiques et chimiques sont provoqués par le trempage et l'action de la température humide ; l'amidon tend à gélatiniser ; ainsi, la texture du grain se trouve consolidée et le grain ne se brise pratiquement plus et résiste bien aux insectes.

6.2.10 Enrichissement

Si l'étuvage a pour but de permettre au riz de conserver la plus grande partie possible de ses éléments vitaminiques, l'enrichissement consiste à ajouter au riz non étuvé blanchi, les éléments qui ont disparu au cours du blanchiment et même des éléments complémentaires. L'enrichissement consiste à mélanger intimement à du riz blanchi des grains de riz dont la teneur en éléments minéraux et en vitamines a été particulièrement accrue ; ces grains constituent le "prémix " que l'on mélange dans la proportion de 0,5 à 1 % au riz blanchi ordinaire.

6.3 Les racines et tubercules

6.3.1 Introduction

Les tubercules (manioc, igname, patate douce, pomme de terre, taro), du fait de leur richesse en amidon, constituent une source énergétique importante dans l'alimentation humaine.

Le manioc peut être considéré comme la quatrième production végétale pour sa contribution à l'alimentation de la population mondiale après le riz, le blé et le maïs. L'Afrique a produit près de 55 % de la production mondiale de manioc en 1999. Les deux plus importants pays africains consommateurs de manioc sont le Nigeria et la République Démocratique du Congo qui consomment à eux seuls le tiers du manioc utilisé en alimentation humaine dans le monde.

Quant à l'igname, elle est produite de façon extensive dans trois régions du monde : l'Afrique occidentale, les Caraïbes et l'Asie du sud-est. 95 % de la production mondiale (à l'exclusion de la Chine Populaire) provient de l'Afrique Occidentale et plus particulièrement de la zone comprise entre la Côte d'Ivoire et le Cameroun. Les plus gros producteurs d'igname dans cette zone sont : le Nigeria (78 % de la production mondiale), la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Bénin et le Togo.

Le taro, la pomme de terre et la patate douce sont produits en plus faible quantité.

Les tubercules étant des organes végétaux gorgés d'eau, leur conservation à l'état frais est difficile.

Le manioc, une fois récolté, est très périssable. Si aucune précaution n'est prise pour sa conservation, il se détériore après 48 heures. Cette détérioration après la récolte est due à deux processus distincts : les changements physiologiques qui surviennent 24 heures après la récolte et les changements microbiens qui se produisent une semaine après la récolte.

L'igname peut se conserver pendant plusieurs mois mais subit également des dégradations (pourrissement, attaque par les insectes, transpiration et germination) qui entraînent d'énormes pertes post-récolte.

Il est donc nécessaire de transformer le plus rapidement possible ces tubercules pour limiter les pertes.

La composition chimique des 3 tubercules : manioc, igname et patate douce est montrée au tableau 6.3.1.

Dans ce chapitre, on exposera de façon succincte les différents types de transformation des tubercules en général et particulièrement de l'igname et du manioc.

Tableau 6.3.1
Composition chimique
globale de quelques
tubercules

% du poids frais	Manioc	Igname	Patate Douce
Eau	66	53 - 83	58 - 81
Amidon	28	15 - 23	17 - 43
Protéines	0,4	1,02 - 1,99	0,45 - 4,37
Mat. grasses	0,2	0,05 - 0,12	0,18 - 1,66

6.3.2 La première transformation

6.3.2.1 La cuisson

L'igname, le manioc, la patate douce, la pomme de terre et le taro peuvent être consommés sous forme bouillie, frite ou grillée.

Cuisson à l'eau : les tubercules sont généralement épluchés, lavés et éventuellement découpés avant d'être cuits. Mais parfois, ils peuvent être bouillis en entier sans épluchage préalable afin de conserver leur teneur en vitamines. L'igname et le manioc bouillis peuvent être consommés soit :

- sous cette forme avec de l'huile et du sel ou avec un jus fait d'huile et de divers condiments (tomate, oignon, etc...).
- sous forme de purée. Les tubercules bouillis sont assaisonnés d'huile et de divers condiments avant d'être réduits en purée ;
- sous forme pilée. Le pilage se fait à l'aide d'un mortier et d'un pilon en bois jusqu'à ce que la structure granulaire de l'amidon soit détruite et qu'une pâte épaisse plus ou moins élastique appelée «foutou » se forme.

Grillage des tubercules : cette opération est réalisée en plaçant les tubercules non épluchés dans la cendre d'un feu mourant, entre des pierres préalablement chauffées.

La friture des tubercules : elle se fait dans n'importe quelle huile alimentaire après les avoir épluchés, lavés et découpés en petits morceaux ou en tranches fines.

Remarque : Pour le manioc, toutes les formes de cuisson citées ci-dessus sont uniquement valables pour les variétés « douces » c'est-à-dire celles qui ont une faible teneur en glucosides cyanogénétiques.

Il existe en effet 2 types de variétés de manioc : les variétés « douces » dans lesquelles les glucosides cyanogénétiques se confinent à faible dose surtout au niveau de la peau, et les variétés amères dans lesquelles ces glucosides se répartissent à forte dose dans tout le tubercule. Le manioc contient principalement 2 glucosides cyanogénétiques : la linamarine et la lotaustraline. Ces deux glucosides sont hydrolysés pour donner l'acide cyanhydrique (HCN ou acide prussique) lorsqu'ils entrent en contact avec l'enzyme linamarase libérée après la rupture des cellules du tubercule du manioc (Figure 6.3.1). Or, l'acide prussique est particulièrement létal s'il est présent à une dose comprise entre 50 et 100 mg dans un aliment ingéré par un homme adulte.

La cuisson ne permet pas à elle seule de détoxifier le manioc « amer ». C'est pourquoi il est déconseillé d'utiliser cette variété pour la cuisson, le grillage et la friture. Par contre le séchage et la plupart des opérations de deuxième transformation contribuent à détoxifier les variétés amères.

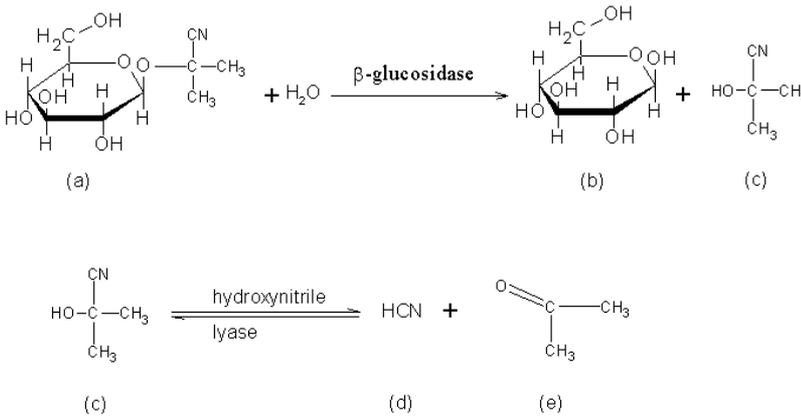


Figure 6.3.1

La linamarine et sa décomposition enzymatique.
 (a) Linamarine
 (b) Glucose
 (c) Acétocyanohydrine
 (d) Acide prussique (acide cyanhydrique)
 (e) Acétone

6.3.2.2 Le séchage

La transformation de l'igname en cossettes : toute variété d'igname peut être a priori utilisée pour la production de cossettes. Mais la variété qui se prête le mieux à la fabrication de cossettes est de l'espèce *Dioscorea rotundata*. Cette variété, connue sous le nom de « kokoro » dans les zones de production du Bénin, est en général de petite taille. Les tubercules épluchés sont trempés dans l'eau et chauffés à une température moyenne de 65 °C pendant quelques minutes. La fin de la précuisson correspond au moment où les

tubercules acquièrent une certaine flexibilité. Les tubercules sont ensuite séchés sur des aires de séchage pendant 3 à 4 jours au soleil. Le produit obtenu en fin de séchage est appelé cossettes d'igname. Ces cossettes sont concassées et réduites en farine par mouture. La farine de cossettes d'igname sert à préparer la pâte (*amala* ou *télibo-wo*) ou le couscous d'igname (*wassa-wassa*).

Production de cossettes de manioc : toutes les variétés de manioc sont aptes à la transformation en cossettes. Les tubercules de manioc sont épluchés, lavés et séchés au soleil, sur des aires de séchage jusqu'à ce qu'ils atteignent un taux d'humidité d'environ 12 %. Les cossettes sèches sont réduites en une farine qui est utilisée pour la préparation de la pâte ou la fabrication des biscuits.

6.3.3 La deuxième transformation

Nous nous limiterons à la deuxième transformation du manioc.

6.3.3.1 La fermentation du manioc

Les racines de manioc sont épluchées, découpées, lavées et râpées. Un ferment à base de manioc peut y être ajouté avant le râpage. La pulpe est mise à fermenter pendant un ou plusieurs jours. Il s'agit d'une fermentation de type lactique. La pulpe fermentée est destinée à la fabrication de divers produits finis dont le *gari* et l'*agbélima* principalement produit dans les Pays du Golfe du Bénin, et l'*attièkè* produit en Côte d'Ivoire.

Production de gari : la pulpe fermentée (pendant 1 à 4 jours) est pressée, émietée, tamisée et cuite jusqu'à ce qu'elle atteigne un taux d'humidité d'environ 10%. Parfois, la pulpe tamisée subit une cuisson partielle, puis un séchage au soleil. Le produit obtenu après cuisson complète ou après séchage s'appelle gari. C'est une semoule de couleur blanchâtre à jaune, à grains secs et durs qui se caractérise par un goût acidulé. Il existe une technique d'incorporation d'huile de palme et de farine de soja qui permet d'obtenir du gari enrichi.

Production d'agbélima : la pulpe est pressée en cours de fermentation. La pulpe fermentée est mélangée avec de la farine de maïs fermentée et cuite sous forme de pâte. La pâte est consommée avec de la sauce.

Production d'attièkè : (couscous de manioc). La râpée de manioc est mélangée à un ferment à base de manioc désigné localement sous le nom de magnan. La fermentation dure 1 à 2 jours. La pulpe séchée est émietée et défibrée. Elle subit ensuite une granulation (roulage), un séchage et un vannage. Les granules secs sont cuits à la vapeur. Le produit obtenu s'appelle attièkè.

D'autres produits sont obtenus après rouissage du manioc. Le rouissage est une fermentation lactique spontanée effectuée principalement en Afrique Centrale. Le procédé consiste à immerger dans de l'eau des racines de manioc, entières ou prédécoupées, pendant trois à cinq jours. Pendant le rouissage, les racines sont

ramollies et les substances qui participent au goût du produit sont élaborées.

Les produits obtenus à partir du manioc roui sont :

Le fofou : les racines de manioc rouies sont émottées ou découpées en cossettes puis séchées au soleil. Les produits séchés sont ensuite réduits en farine qui est utilisée pour préparer une pâte dense de texture élastique.

La chikwangue : c'est une pâte vendue emballée dans des feuilles végétales au Congo. Elle est de texture élastique et encore plus dense que le fofou. C'est le produit final d'une longue et fastidieuse transformation par voie humide des racines rouies qui comprend plusieurs opérations : défibrage du manioc roui, laminage, précuisson, malaxage, modelage et cuisson terminale.

6.3.3.2 L'extraction de l'amidon de manioc

Selon la méthode traditionnelle, les principales phases pour obtenir l'amidon sont : l'épluchage, le lavage, le râpage, la filtration et le séchage. Après la récolte, les tubercules frais sont épluchés à la main, lavés et ensuite râpés en pulpe. Cette pulpe est placée dans un panier suspendu au-dessus d'une cuve recouverte d'un morceau de tissu propre. Après avoir versé de l'eau sur le panier, l'amidon lavé est filtré par le tissu et s'écoule dans le récipient placé en dessous du panier. Cette opération est répétée jusqu'à évacuation totale de l'amidon. Le liquide recueilli est laissé décanté et l'amidon se dépose au fond du récipient. Le surnageant est éliminé et l'amidon est séché au soleil ou utilisé tel quel.

Une autre méthode traditionnelle consiste à déverser les râpures dans des sacs et à les immerger complètement dans l'eau. Ces sacs sont ensuite pressés pour obtenir le liquide blanc qui s'écoule dans des seaux. De l'eau fraîche est ajoutée à chaque baisse de niveau. L'opération est répétée jusqu'à ce que l'eau d'écoulement devienne claire. Le liquide obtenu repose pendant plusieurs heures pour permettre la décantation de l'amidon. Le surnageant est éliminé et l'amidon est lavé 3 à 4 fois avant d'être éventuellement séché au soleil.

Dans les petites et moyennes entreprises, la pulpe est obtenue à l'aide d'une râpeuse mécanique ou d'un broyeur désintégrateur. Le lait d'amidon est extrait soit à l'aide d'un tamis rotatif et vibrant, soit à l'aide de centrifugeuse puissante. Le lait d'amidon est stocké dans un bassin de sédimentation au fond duquel l'amidon se dépose. Après séparation et raffinage, on récupère l'amidon.

L'amidon séché est réduit en farine par mouture. Cette farine est ensuite utilisée en biscuiterie, en boulangerie et en blanchisserie.

Fabrication du tapioca : on utilise l'amidon humide. Celui-ci est tamisé, granulé et cuit sous agitation, à température modérée (60 °C environ), dans un récipient à fond plat. Le produit obtenu en fin de cuisson s'appelle tapioca et se présente comme un noyau d'amidon

enfermé dans une enveloppe de gélatine fine mais ferme. Le taux d'humidité du tapioca est d'environ 12%.

Production de sirop de glucose : l'amidon de manioc est liquéfié et saccharifié par les enzymes α et β amylases du riz germé. On procède à une filtration et à une concentration à 80% de sucre. Il s'agit d'une technologie d'origine vietnamienne qui est en cours d'adoption dans plusieurs pays africains.

6.3.3.3 La production d'alcool de manioc

Le manioc frais contient jusqu'à 30 % d'hydrate de carbone sous forme d'amidon. Cette caractéristique en fait l'un des produits de base les plus adaptés à la fermentation pour la production d'alcool. L'alcool éthylique dérivé du manioc est le résultat d'une série de processus chimiques consistant à saccharifier l'amidon de manioc, à fermenter la solution subséquente et à distiller ensuite l'alcool.

6.4 Les produits oléagineux

6.4.1 Introduction

Les huiles végétales sont produites à partir des graines des plantes que l'on trouve dans différentes régions du monde. Parmi la centaine de types de graines oléagineuses connues, un petit nombre a une signification commerciale. Ce sont : la graine de coton, l'arachide, le tournesol, la noix de coco, la noix de palme, la noix de karité, la graine de lin, l'olive, le sésame, le navet, la graine de ricin.

L'importance majeure des huiles végétales est la nutrition humaine (sous forme d'huile ou de margarine). D'ailleurs, beaucoup de graines ont une teneur élevée en protéines, ce qui permet leur utilisation comme fourrage. Les huiles végétales peuvent aussi être utilisées pour d'autres applications industrielles, comme par exemple, la production de savon, de peinture, de vernis, de plastiques. Les huiles végétales peuvent être divisées en trois groupes selon leurs utilisations (Tableau 6.4.1).

Tableau 6.4.1
Utilisation des huiles
végétales

Groupe 1 Nutrition humaine	Groupe 2 Nutrition humaine + autres industries	Groupe 3 autres industries
coton	palmier	lin
tournesol	palmiste	ricin
navet	cocotier	
sésame	arachide	
olive	karité	
	soja	

Les oléagineux sont des plantes dont les graines servent à produire, artisanalement ou industriellement, de l'huile ou des beurres. Ils ont un rôle économique pour les pays en développement.

Les produits sont largement exportés et ils forment une source importante de devises et contribuent à l'équilibre alimentaire des populations, du fait de leur richesse en lipides et pour certains, en protéines.

Quelques plantes oléagineuses d'importance mondiale sont le soja, le palmier à l'huile, le colza, le tournesol et l'arachide (Tableau 6.4.2). Dans la région de l'Afrique de Ouest, le karité est une plante oléagineuse d'importance régionale.

Tableau 6.4.2
Les principales
huiles végétales
(données de 1998)

Cultures	Production mondiale (en 10 ³ tonnes)		% Mat. Grasses des grains	Principaux pays producteurs
	Grains ou noix	Huile		
Soja	158220	23930	13 - 20	USA, Brésil, Chine
Tournesol	25216	9320	32 - 40	Russie, Ukraine, Argentine, Inde
Arachide	32282	4750	45	Chine, Inde, Nigéria, Soudan
Coton	33268	3540	15 - 25	Chine, USA, Inde
Coco	14094	2291	63	Indonésie, Inde, Philippines Mexique
Olive	14094	2291	15	Yougoslavie, Italie, Grèce, Tunisie
Palmier	31829	18144	20 - 22	Malaisie, Indonésie, Nigéria
Palmiste	5242	2420	48 - 52	Malaisie, Indonésie, Nigéria

Les huiles primaires sont souvent raffinées. L'objectif du raffinage est de maintenir ou d'améliorer les caractéristiques organoleptiques et la stabilité des corps gras alimentaires.

Quelques opérations de raffinage :

- Démucilagination : élimination des cires et des mucilages, lavage de l'huile avec de l'eau légèrement acidulée. Cette opération évite les dépôts dans les bouteilles et la formation de mousse lors de la friture.
- Neutralisation : élimination des acides gras libres par addition de soude. Les savons issus de cette opération peuvent être éliminés par centrifugation.
- Décoloration : elle est faite en utilisant de la terre décolorante. La couleur de l'huile est ainsi améliorée.
- Désodorisation : chauffage de l'huile sous grand vide pour éliminer les odeurs indésirables.

Quelques caractéristiques des technologies industrielles et artisanales employées pour le raffinage sont décrites au tableau 6.4.3.

Quelques méthodes pour améliorer les pratiques sont :

- accroître la qualité (notamment sanitaire) des huiles et sous-produits
- réduire la pénibilité et la durée du travail
- augmenter le rendement
- favoriser la commercialisation

On peut intervenir sur le procédé à quelques niveaux, au niveau individuel ou familial, au niveau artisanal ou au niveau de la peti-

Tableau 6.4.3
Revue des technologies de raffinage aux échelles industrielles et artisanales

Technologie industrielle	Technologie artisanale
Investissement lourd	Investissement faible
Techniques complexes	Techniques simples
Technique d'extraction rapide et efficace	Technique d'extraction longue, pénible, laborieuse et peu efficace
Grande capacité de production	Faible capacité de production
Rendement élevé en huile	Rendement faible
Emballage propre, hermétique, sans risque d'oxydation	Emballage ni propre, ni hermétique, avec risque d'oxydation
Huile raffinée donc exempte d'impuretés	Huile contenant beaucoup d'impuretés
Longue durée de conservation	Durée de conservation réduite
Bonne image de marque sur les marchés urbains	Mauvaise image de marque, mais ???!
PLUS CHERE	MOINS CHERE
Probablement problèmes d'approvisionnement en matières premières	
Rentabilité contestée, difficulté de gestion	

te industrie. Il faut prendre des précautions en matière d'intervention, comme une analyse des techniques et matériels utilisés et disponibles dans la région; une analyse des facteurs sociaux, économiques, techniques et environnementaux; une étude de marché et une évaluation des possibilités de commercialisation et une analyse de viabilité (Tableau 6.4.4).

6.4.2 Libération des graines

Etant donné que les plantes oléifères ont toutes leur spécificité, la technique de libération des graines varie selon les cas.

Soja, arachide, coton : on applique un traitement de décorticage. Les appareils utilisés pour le décorticage consistent ordinairement en une cage cylindrique horizontale dont la paroi est formée soit de barreaux métalliques, soit d'une tôle perforée. A l'intérieur de cette cage, dans laquelle les gousses à décortiquer sont introduites, tourne un arbre garni de croisillons batteurs sous l'action duquel les gousses sont comprimées et froissées. Le mélange des graines et des morceaux de gousses non décortiquées restent à l'intérieur.

Tournesol et navet : les graines sont libérées des fleurs par une action de battage suivie par un tamisage.

Noix de coco : les amandes de coco extraites des coques sont séchées au soleil ou à l'air chauffé artificiellement. Le produit sec s'appelle le coprah et sert comme produit de base pour l'huilerie. En général en Afrique de l'Ouest, on extrait l'huile de façon artisanale par voie humide à partir du coco non séché. Les noix sont fendues en 3 parties avec un coupe-coupe. Les amandes sont ensuite extraites des coques bourrées avec un couteau.

Noix de palme : les régimes de palme sont stérilisés d'abord afin de faciliter l'égrappage, qui consiste en la séparation des rafles et

des fruits. Cet égrappage s'effectue par chocs répétés; les fruits passent à travers des barreaux ou des ouvertures ne permettant pas le passage des rafles.

6.4.3 L'huilerie

6.4.3.1 Généralités sur le procédé industriel

L'extraction d'huile, à partir des graines, se fait dans l'huilerie. Bien que les conditions au cours du procédé varient selon les types et selon la qualité des graines, le procédé global se présente comme suit :

Nettoyage : les graines sont débarrassées des impuretés métalliques à l'aide d'aimants et sont débarrassées des restes de coques par tamisage ou par séparation pneumatique.

Tableau 6.4.4
Différents types
d'utilisations de
plantes oléagineuses

Plante oléagineuse	Teneur en huile	Utilisations primaires	Sous-produits	Utilisation des sous-produits
Noix de palme (pulpe du fruit)	56 %	Huile alimentaire, margarine, savon	Rafles des fruits, résidus fibreux et boues	Combustible/ engrais
Noix palmiste (amande du fruit)	46 - 57 %	Huile alimentaire, savon crème pour le corps et les cheveux	Coques, tourteaux de palmiste	Combustible-charbon Alimentation du bétail
Noix de coco	coprah séché: 64 - 70 % pulpe fraîche: 0 - 35 %	Huiles alimentaires industrielles, savon, cosmétiques (crème pour le corps et les cheveux), parfumerie confiserie, pharmacie	Coques, fibres, tourteaux	Combustible-charbon, artisanat d'objets en fibre, alimentation du bétail
Arachide	38 - 50 %	Huile alimentaire, margarine, pâte d'arachide, savon, détergents, cosmétiques	Coques, tourteaux	Paillage/litière, panneaux de particules, alimentation humaine ou animale
Sésame	35 - 50 %	Huile	Tourteaux	Alimentation humaine ou animale
Balanite	44 - 51 %	Huile alimentaire, savon	Tourteaux	Alimentation du bétail
Tournesol	25 - 40 %	Huile alimentaire, savon	Tourteaux	Alimentation du bétail
Colza-Moutarde	40 - 45 %	Huile	Tourteaux	Alimentation du bétail
Coton	15 - 25 %	Huile alimentaire, savon	Tourteaux	Alimentation du bétail et humaine (si non toxique)
Ricin	35 - 55 %	Peintures, lubrifiant	Tourteaux	Alimentation du bétail (si non toxique)
Karité	34 - 44 %	Beurre comestible, cosmétiques, savon, médicaments	Tourteaux, coques	Alimentation pour le bétail, combustible
Neem	45 % de l'amande	Savon		
Neug ou graines de Niger	38 - 50 %	Huile alimentaire, savon peintures, éclairage	Tourteaux	Alimentation du bétail
Soja	15 - 22 %	Margarine	Tourteaux	Alimentation du bétail
Carthame	36 - 48 %	Huile alimentaire		

Broyage : un broyage préalable facilite la pénétration de la vapeur pendant le conditionnement. Ce broyage est souvent effectué à l'aide de rouleaux.

Conditionnement : les graines sont traitées à la vapeur afin de faire éclater la plupart des cellules. Parfois, il y a déjà une partie de l'huile qui s'échappe spontanément, "l'huile vierge".

Extraction de l'huile : on connaît deux procédés, l'extraction sous pression et l'extraction par solvant.

L'extraction sous pression : une presse mécanique ou "expeller" est utilisée. Elle est essentiellement constituée d'une ou plusieurs cages cylindriques, ou légèrement coniques, formées de barreaux en acier spécial espacés de quelques dixièmes de millimètre. À l'intérieur de chacune de ces cages, tourne un arbre garni d'éléments à vis, dont le nombre, la disposition et le pas varient suivant le travail recherché. Les graines conditionnées sont introduites à une extrémité de la cage et entraînées par les éléments à vis vers l'autre extrémité. La mouture sort ensuite par l'espace annulaire compris entre l'arbre et les barreaux terminaux, espace qui peut être plus ou moins obturé à l'aide d'un cône coulissant sur l'arbre ou d'un diaphragme réglable. Ce dispositif, combiné avec un écartement décroissant entre les barreaux dans les sections de cages proches de la sortie et avec une conicité éventuelle de la cage ou de l'arbre, permet de réaliser une pression de plus en plus forte au fur et à mesure que progresse la matière. Dans les modèles de presses les plus puissants, on atteint ainsi des valeurs de l'ordre de 2000 kg/cm^2 .

L'huile s'écoule par les interstices ménagés entre les barreaux et tombe sur un tamis où elle abandonne une partie de ses débris. Elle est ensuite dirigée vers un réservoir et débarrassée des impuretés restantes à l'aide d'un filtre-pressé à plateaux. Quant au tourteau, il est brisé, à sa sortie de la cage, par un dispositif approprié ; si l'usine travaille en pression unique, il est ensuite refroidi et mis en sacs ou stocké en vrac. Si la pression est suivie d'une extraction par un solvant, le tourteau est concassé avant d'être dirigé vers l'extracteur.

L'extraction par solvant : Les tourteaux de pression sont convenablement préparés et portés à une température appropriée ; ils sont alors mis en contact (pendant un temps approprié) avec un solvant, lui aussi porté préalablement à la température voulue (par exemple hexane à 50°C). On obtient ainsi une solution d'huile dans le solvant, appelée "miscella", que l'on soumet à un chauffage en vue de la concentrer et, finalement, d'en recueillir l'huile par distillation et condensation des vapeurs de solvant. La matière épuisée, qui a retenu une certaine quantité de solvant, est, elle aussi, chauffée afin d'en retirer le solvant par évaporation et condensation.

Actuellement, particulièrement dans les grandes usines, on utilise surtout des installations permettant de réaliser sans aucune

discontinuité l'ensemble des opérations (extraction proprement dite, concentration et distillation du miscella, récupération du solvant). Cependant, on trouve encore de petites installations fonctionnant en discontinu (ou semi-continu). Dans ce cas, la récupération du solvant retenu par le tourteau déshuilé est effectuée dans l'extracteur lui-même, et non dans un appareil spécialement affecté à ce travail.

Raffinage de l'huile : le raffinage de l'huile comporte la démucilagination, la neutralisation, le blanchiment et la désodorisation. La démucilagination permet d'obtenir, d'une part, de la lécithine pouvant être éventuellement déshydratée et purifiée et, d'autre part, des pâtes de neutralisation débarrassées de ce produit, qui constitue un agent d'émulsification.

On neutralise les acides gras libres afin de pouvoir les séparer de l'huile sous forme de savon.

La décoloration, ou blanchiment, est généralement effectuée sous vide (environ 700 mm Hg) à une température de l'ordre de 80 °C, dans une batteuse pourvue d'un dispositif de chauffage, par incorporation de 1 à 2 % de terre activée (diatomées) dans l'huile préalablement déshydratée. Après un temps de contact de 20 à 30 minutes, le mélange d'huile et de terre est passé sur filtre-pressé.

La désodorisation est effectuée de façon classique, en discontinu ou en continu, par entraînement à la vapeur des matières volatiles sous vide poussé (environ 750 mm Hg) à une température voisine de 180 °C.

L'huile raffinée doit être stockée avec encore plus de précautions que l'huile brute, car elle ne contient pas d'anti-oxydant naturel. Il convient donc de la conserver à l'abri de la lumière, de la chaleur, et de l'humidité, dans des réservoirs d'une parfaite propreté. On limite la durée de cette conservation avant la mise en petits emballages qui seront ensuite soustraits à l'action des agents précités, particulièrement à la lumière.

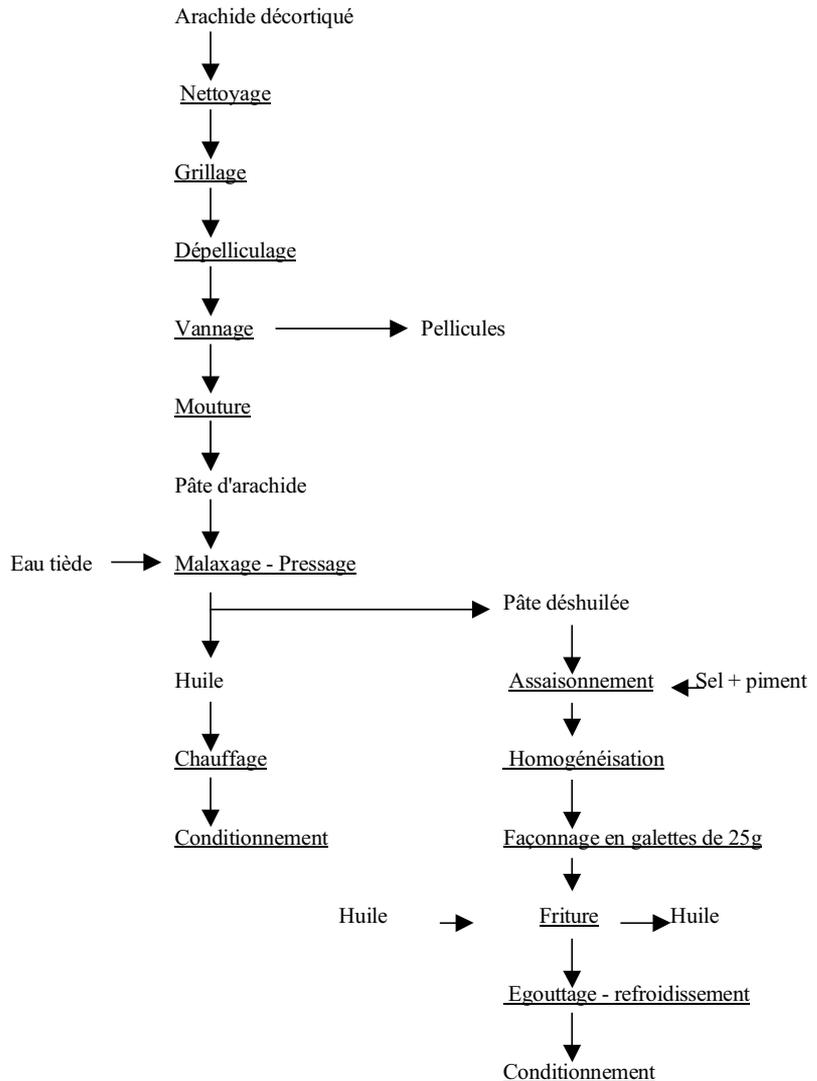
6.4.3.2 *Quelques méthodes traditionnelles d'extraction de l'huile en Afrique*

Extraction de l'huile de coco : la méthode traditionnelle d'extraction d'huile de coco en Afrique de l'Ouest est l'extraction par voix humide à partir de l'amande fraîche. L'amande est râpée soit avec un grattoir fait de planche de bois et d'un morceau de tôle perforée, soit avec une râpeuse motorisée fonctionnant sur le même principe (un moteur entraînant un tambour en bois recouvert de tôle perforée). L'amande râpée est malaxée ou foulée avec de l'eau froide ou de l'eau chaude avant d'être pressée. On obtient une émulsion et du tourteau. Celui-ci est utilisé pour l'alimentation des porcs. L'émulsion est laissée au repos pendant quelques heures. La crème surnageante est chauffée pour en extraire l'huile de coco. Un deuxième type de tourteau est obtenu et sert également à l'alimentation des porcs. La technologie traditionnelle est caracté-

térisée par la pénibilité des opérations, un plus faible rendement d'extraction de l'huile, une huile qui se conserve peu du fait de sa teneur en eau trop élevée.

Extraction de l'huile d'arachide : Les graines d'arachide décortiquées, directement grillées à la chaleur sèche, sont dépelliculées et vannées. Le produit est ensuite moulu soit par pilage, soit sur meules dormantes, soit au moulin à meules. Tout en y ajoutant progressivement du sel et de l'eau chaude, la pâte obtenue est pétrie et pressée jusqu'à ce que le maximum d'huile soit extrait. La pâte déshuilée récupérée est utilisée pour préparer des galettes. Le rendement en huile est généralement faible (25 à 30%). Le diagramme de production est présentée à la figure 6.4.1. L'huile brute obtenue est un liquide un peu trouble, de couleur jaunâtre. Elle est chauffée modérément et décantée avant conditionnement.

Figure 6.4.1
Diagramme de production d'huile d'arachide et de galettes « klui-klui »



Extraction de l'huile de palme et de palmiste : les méthodes d'extraction comprennent le chauffage dans l'eau, le broyage ou foulage et le pressage à la main. Le schéma de traitement traditionnel des fruits de palmier est présenté à la figure 6.4.2.

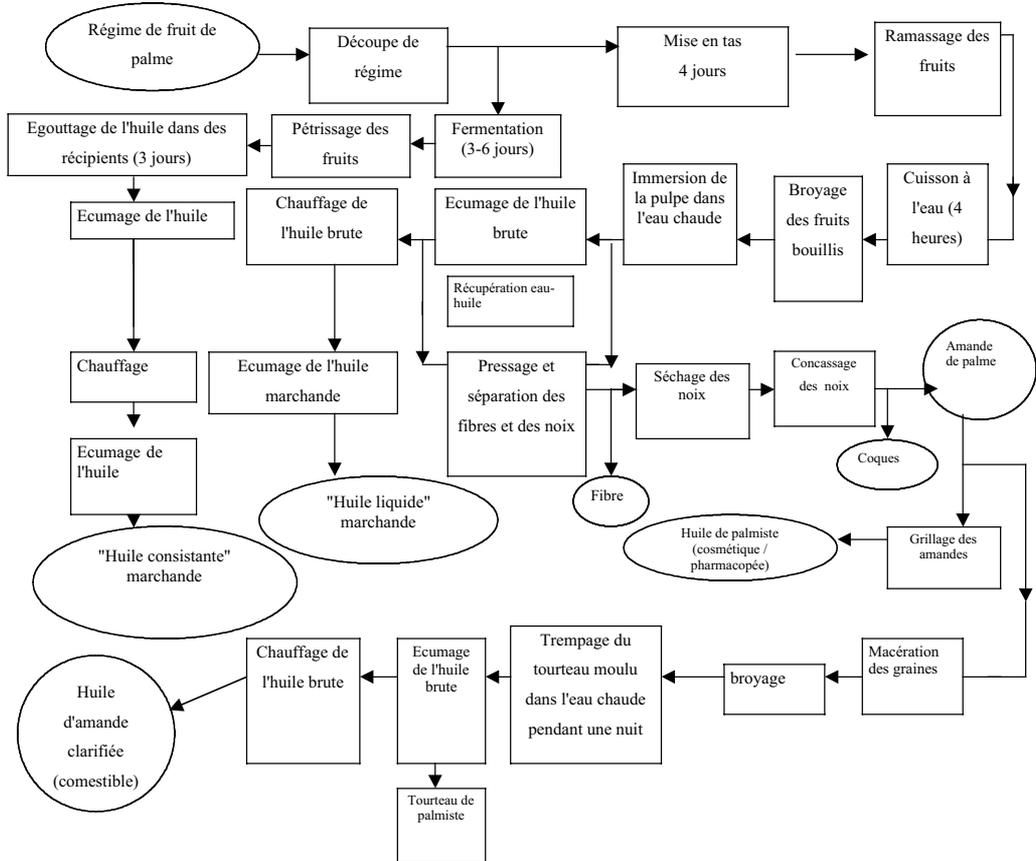


Figure 6.4.2
Schéma de traitement traditionnel des fruits de palmier

6.4.4 La savonnerie

Le procédé global de fabrication du savon comporte les étapes suivantes :

Mélange : on mélange divers types de matières grasses et on ajoute éventuellement des acides gras libres, suivant la qualité et le prix du produit désiré.

Empâtage : le mélange est maintenu à une température d'environ 80 – 90°C dans une grande marmite pendant l'addition lente de la quantité de soude (NaOH) nécessaire à la saponification de l'ensemble.

Séparation des phases (Rélargage) : on ajoute une certaine quantité de solution de sel (NaCl) et de NaOH, qui a pour but d'emmener les impuretés lors de sa chute au travers du savon. Après la séparation des deux phases, on retire la phase aqueuse.

Malaxage : le produit, qui s'appelle savon liquide, est homogénéisé à l'aide d'un malaxeur.

Solidification : le savon liquide est refroidi en dessous de son point de solidification à l'aide d'un filtre-presse. On obtient, comme résultat, des plaques de savon solide.

Découpage : les plaques de savon sont découpées selon les dimensions des barres, qui sont ensuite divisées en morceaux de savon.

Séchage : les morceaux de savon sont séchés dans un tunnel à sécher.

Conditionnement et livraison : selon la demande du marché, les morceaux peuvent être enveloppés dans du papier. Ils sont finalement emballés dans des cartons.

6.4.5 La margarine

La margarine est une émulsion d'eau et de matières grasses. Cela implique, déjà, qu'on la prépare à partir de deux types de matières premières : une phase grasse et une phase aqueuse.

Préparation de la phase grasse : à partir d'huiles raffinées, on compose un mélange avec un point de solidification tel que la margarine permette de bien enduire les aliments destinés à la consommation. Cette température peut donc varier suivant les climats. Afin d'obtenir une plus haute température de solidification, on ajoute des lipides durcis par hydrogénation. On ajoute également au mélange des vitamines A et D et un colorant à base de carotène, la provitamine A, qui sont solubles dans les matières grasses. Par ailleurs, on ajoute souvent une composition d'arômes artificiels.

Préparation de la phase aqueuse : une partie de l'arôme de la margarine est fournie par la phase aqueuse, qui consiste en lait écrémé acidifié. On fait alors fermenter du lait écrémé à l'aide d'une culture de bactéries productrices d'acide lactique dans des conditions bien précises. C'est pendant cette fermentation qu'aura lieu la formation des arômes spécifiques du beurre; selon le goût des consommateurs, on ajoute ensuite un certain pourcentage (0 - 2 %) de sel à la phase aqueuse.

Emulsion : les deux phases sont pompées dans un appareil à action continue qui consiste en un réfrigérateur tubulaire (votator). Le tube est pourvu de couteaux rotatoires qui transportent le mélange sous pression à travers le système. Le produit refroidit rapidement et commence à se cristalliser au contact de la paroi du tube. Les couteaux l'enlèvent de la paroi et le mélangent intimement avec le reste du produit. Le degré de cristallisation et les dimensions des cristaux déterminent la texture du produit fini.

Emballage : le produit fini est expulsé de l'appareil sous forme de boudin rectangulaire, qui est ensuite coupé suivant les dimensions et le poids des unités de vente. L'emballage se fait dans du papier pour les margarines dures, tandis que les margarines douces (faciles à enduire) sont emballées dans des cuves en PVC (Chlorure de PolyVinyle).

6.5 Les fruits et légumes

6.5.1 Introduction

Les fruits et légumes constituent un groupe d'aliments végétaux dont la distinction est essentiellement d'ordre gastronomique.

Du point de vue botanique, les fruits sont les structures de la plante qui, au stade de la maturité, contiennent des graines. On estime généralement que les caractères communs aux fruits sont : la richesse en sucre, l'acidité relativement élevée, le parfum prononcé. En outre, ils se consomment à l'état cru.

Les légumes quant à eux, recouvrent divers types de structures végétales dont les feuilles (laitues...), les racines (carottes...) les fruits (tomates, gombo...). Généralement, les légumes sont caractérisés par une faible acidité.

Les fruits constituent l'une des plus importantes productions végétales. Les agrumes viennent en tête, suivis par les pommes, les raisins et les ananas.

L'importance accordée aux fruits et légumes est surtout liée au rôle prépondérant qu'ils jouent dans la nutrition humaine en tant qu'une des principales sources de micro-nutriments (vitamines et sels minéraux).

Les pays en développement, et notamment l'Afrique, produisent des quantités importantes de fruits et légumes, généralement consommés en frais. Cependant, leur forte teneur en eau les rend sensibles aux actions des agents physico-chimiques et biologiques de dégradation. Ils sont donc très périssables et ne peuvent être conservés à l'état frais que pendant quelques jours au maximum, d'où la nécessité de les mettre sous une forme où ils peuvent se conserver plus longtemps.

En Afrique, très peu de techniques de transformation des fruits et légumes à petite échelle sont développées. Toutefois, certains produits comme la tomate et l'oignon sont transformés en purée concentrée au niveau des ménages. Le piment et le gombo sont séchés avant d'être parfois moulus.

Ce chapitre vise à exposer brièvement les différentes méthodes de conservation et de transformation des fruits et légumes.

6.5.2 La conservation /transformation des fruits et légumes

Les techniques de conservation et de transformation comportent en général deux groupes d'opérations :

- Les opérations de pré-traitement du produit à transformer (nettoyage, lavage) ;
- Les opérations de traitement (déshydratation, cuisson, séchage...).

Pour une bonne conservation des produits transformés, ces techniques doivent respecter dans leur mise en œuvre les exigences ci-après :

- Partir des produits sains et intacts ;

- Mettre en œuvre des opérations qui permettent de détruire ou d'inhiber les agents de dégradation ;
- Assurer la propreté hygiénique (stérilité) des matériels de conditionnement ;
- Assurer l'étanchéité des matériels de conditionnement.

6.5.3 Traitement des fruits et légumes avant conservation

Pour rendre les fruits et légumes aptes à la conservation et à la transformation, un certain nombre d'opérations de pré-traitement sont nécessaires. L'ordre des opérations de pré-traitement varie suivant l'espèce de fruits ou légumes concernée et le mode de conservation choisi.

Lavage-Nettoyage : Cette opération permet d'éliminer les pierres, les déchets terreux, les feuilles, une partie des micro-organismes de surface et les résidus de produits chimiques pulvérisés avant récolte. Ces pesticides, indépendamment de leur toxicité, peuvent provoquer des altérations de couleur et de saveur ou favoriser la corrosion des emballages métalliques. Le lavage peut se faire :

- Par trempage du produit dans de l'eau pure ou contenant 5 à 10 % de sel ou 0,1 à 5 % de lessive de soude. Dans ces deux derniers cas, un rinçage soigneux doit suivre le lavage ;
- Par aspersion d'eau ;
- Par aspersion suivie d'un trempage.

L'eau utilisée doit être dans la mesure du possible, propre, fraîche, potable et être renouvelée.

Triage et calibrage : Ils permettent l'obtention de produits de grosseur ou de maturité homogène d'une part, et l'élimination des produits altérés et des débris foliacés d'autre part. Le triage peut se faire suivant la taille du produit (trilage par grosseur ou calibrage) ou selon la maturité (uniformité de couleur ou de fermeté).

Pesage : Il permet de :

- Connaître la quantité de fruits ou légumes arrivant à l'usine s'il est effectué avant triage et lavage ou la quantité nette de fruits ou légumes à transformer s'il est effectué après triage et lavage ;
- Calculer les quantités d'ingrédients à ajouter aux produits dans le cas de certaines transformations. On les exprime en kg par kg ou par 100 kg de produits.

Parage (épluchage ou pelage) : il consiste à enlever les parties abîmées ou les éléments non comestibles ou indésirables des fruits ou des légumes traités, (Exemple : le cœur de l'ananas) qui pourraient dénaturer la saveur du produit fini et altérer ses qualités organoleptiques. Lorsqu'il s'agit de l'élimination de la peau de certains fruits ou des parties externes non comestibles de certains légumes, on parle d'épluchage ou de pelage. Le parage n'inclut pas l'enlèvement des pépins et du noyau.

Dénoyautage–Épépinage : cette opération consiste à éliminer le noyau et les pépins qui pourraient donner une amertume prononcée au produit fini, s'ils étaient traités avec la chair du fruit. Le dénoyautage et l'épépinage sont effectués soit :

- Manuellement avec des cuillers dénoyauteuses ou épépineuses, d'ustensiles épépineurs ou dénoyauteurs ménagers à pousoir ;
- Mécaniquement avec des dépulpeurs ou des centrifugeuses essoreuses.

Découpage–Râpage : le découpage et le râpage ont pour but de réduire la taille du produit traité, principalement son épaisseur qui peut constituer un obstacle à :

- La migration de l'eau lors du séchage ;
- La pénétration de sel, d'acide ou de sucre ;
- La pénétration de chaleur lors de l'appertisation.

La diminution de l'épaisseur du produit permet ainsi de réduire le temps de traitement, ce qui assure une meilleure conservation des qualités organoleptiques et nutritionnelles (séchage et appertisation). Pour assurer l'homogénéité des traitements, il importe que la taille des morceaux soit sensiblement du même ordre.

Le découpage se fait soit manuellement avec des couteaux en acier ou des trancheuses à lames multiples, soit mécaniquement avec des trancheuses dites coniques. Le râpage se fait avec des râpes (manuelles ou entraînées par un moteur ou un pédalier).

Broyage : il est effectué, en ce qui concerne les fruits, dans le but d'obtenir un nectar ou une purée. Il peut être aussi effectué en tant que pré-traitement du séchage de façon à faciliter la déshydratation ou en tant que post-traitement de séchage pour transformer les produits séchés en poudre.

Le broyage manuel se fait au mortier et au pilon tandis que pour le broyage mécanique, on utilise des broyeurs (à marteaux ou à meules).

Pressage : cette opération a pour but d'extraire le jus des fruits, tout en effectuant un tamisage de la pulpe. Elle permet donc d'obtenir un jus de fruit clair ou pulpeux contrairement à la méthode de broyage qui donne une purée. Pour ne pas enrichir le jus en tanins, ce qui lui donnerait une astringence excessive, il est nécessaire d'éliminer pépins et noyaux avant le pressage.

Le broyage se fait à l'aide de presses (hydrauliques, pneumatiques, à levier, à vis ...) ou d'essoreuses centrifugeuses.

Tamisage : cette opération s'applique aux produits déshydratés ayant subi une opération de broyage. Elle est également effectuée sur des produits liquides ou pâteux et a pour but dans ce cas d'éliminer les particules les plus grossières et les morceaux de fruits non désagrégés.

Le tamisage se fait à l'aide de tamis traditionnels en osier très-fins ou des tamis animés de mouvement de vibration.

Clarification-débouillage : l'opération de clarification-débouillage consiste à éliminer du moût du fruit (qui n'est pas toujours consommable tel quel), les particules ou composants désagréables pour la dégustation ou nuisibles à sa bonne tenue. Si le moût était tamisé au préalable, l'essentiel de ces particules ou composants sont les matières colloïdales en solution (protéines, tannins, pectines) et les matières insolubles en suspension (débris celluloseux).

La clarification-débouillage se fait de diverses manières :

- Naturellement en laissant le jus au repos;
- Par préchauffage à une température inférieure à 100°C;
- Par enzymation (ajout d'enzymes pectolytiques par exemple);
- Par collage en apportant une matière colloïdale comme la gélatine en solution à 1 ou 2%. Celle-ci se combine aux protéines et tannins du moût et précipite en entraînant les impuretés du jus.

La clarification s'effectue dans des bacs de décantation ou des cuves en bois ou acier inoxydable.

Blanchiment et précuisson : Le blanchiment est un traitement thermique de quelques minutes à 95-100 °C destiné à inactiver par la chaleur, les enzymes responsables du brunissement enzymatique ou de modification des couleurs naturelles de certains fruits ou légumes. En réalité, la destruction des enzymes n'est qu'un objectif parmi bien d'autres, le rôle du blanchiment qui constitue un pré-traitement avant séchage, appertisation ou congélation, est multiple. Le blanchiment permet en outre de :

- Dilater les cellules végétales par ramollissement du fruit ou du légume, ce qui provoque l'élimination de l'oxygène de l'air intracellulaire (responsable de la corrosion ultérieure des matériaux de conditionnement et du bombage chimique des boîtes);
- Réduire la charge microbienne à la surface des fruits et légumes et arrêter les fermentations;

Dans la conservation des fruits et légumes, le blanchiment est considéré comme un mal nécessaire et présente quelques inconvénients dont le plus important est la perte de substances solubles par lessivage et par diffusion (protéines, sucre, vitamines, minéraux) d'où une diminution de la valeur nutritionnelle du produit. Le blanchiment peut être fait avec :

- De l'eau en ébullition (éventuellement acidifiée ou salée) ou avec de la vapeur d'eau. On utilise environ 1 litre d'eau pour 1 kg de fruits ou légumes;
- De la vapeur d'eau : dans ce cas, la quantité d'eau et l'énergie utilisée sont moindres mais le procédé est plus coûteux et plus lent que le blanchiment à l'eau.

6.5.4 Les différentes méthodes de conservation

Conservation par la chaleur (appertisation) : c'est la méthode de conservation qui consiste à enfermer l'aliment dans un récipient hermétiquement clos, et à le soumettre à un chauffage assurant la destruction ou l'inactivation des micro-organismes et des enzymes susceptibles de l'altérer. L'appertisation s'applique à de nombreux fruits et légumes (petits pois et tomates en boîte, fruits au sirop, jus de fruits, nectar de fruits...).

Dans la mesure où les légumes diffèrent des fruits du point de vue composition chimique, les conditions de chauffage ne sont pas similaires. Les légumes ont une acidité plus faible ($\text{pH} > 4,5$) que les fruits et peuvent contenir plus de micro-organismes du sol thermo-résistants que les fruits. En outre, beaucoup de légumes exigent plus de cuisson que les fruits pour l'amélioration de leur saveur et de leur texture. Pour ces raisons, les légumes mis en boîtes exigent généralement un traitement thermique plus intense que celui appliqué aux fruits (stérilisation). En effet, l'acidité réduit le temps et la température nécessaires à la conservation des fruits par le chauffage ($\text{pH} < 4,5$) (pasteurisation). Pour assurer la stabilité des conserves de fruits, la température à cœur du récipient contenant ces produits doit être portée à environ :

82 - 85°C pour les purées ;

80 - 85°C pour les jus troubles et de pH 3,5 à 4,2 ;

75 - 80°C pour les jus limpides et de $\text{pH} < 3,5$;

85°C pour les fruits au naturel et au sirop.

Conservation par le sel, le vinaigre ou le sucre : la conservation des fruits ou des légumes par le sel et le vinaigre s'effectue suivant deux principes différents, selon que l'on autorise une fermentation ou non :

- On peut tout d'abord traiter les légumes avec du sel en forte concentration (15% minimum) sans ajouter de vinaigre. A cette teneur, les germes putréfiants ainsi que les germes pathogènes sont inhibés et il n'y a pas de fermentation dans le produit (sel = agent de conservation).
- On peut procéder également d'une deuxième manière en traitant les légumes par des solutions à une concentration de l'ordre de 8 à 10% de sel, ce qui permet le développement sélectif d'une certaine catégorie de micro-organismes (les bactéries lactiques) et autorise une fermentation. En effet ces bactéries vont transformer les sucres fermentescibles du produit pour la plupart. Cet acide, ainsi que l'acide acétique provenant du vinaigre que l'on ajoute également, inhibe le développement d'autres micro-organismes nuisibles, tels que les bactéries productrices de spores, les bactéries protéolytiques et les organismes pectolytiques. (Sel + vinaigre = agent de conservation).

Quant à la conservation par le sucre, elle a pour but de confire le fruit, c'est-à-dire de porter la teneur en sucre de leur suc cellulai-

re à une valeur telle que le produit obtenu ne peut plus s'altérer. La conservation est alors assurée par :

- L'acidité naturelle des fruits;
- La concentration élevée en sucre inhibant tout développement microbien (et notamment de moisissures) par abaissement de a_w .

Exemples de fruits conservés par le sucre :

Sirops de fruits : ils sont obtenus après cuisson d'un jus de fruit (agrumes, ananas...) ou d'un extrait de plante (bissap, tamarin, gingembre...), filtré, éventuellement additionné d'un acide et mélangé à du sucre à raison de 150 à 200 g de sucre pour 100 g de liquide.

Confitures, gelées et marmelades : Une confiture est une préparation de fruits entiers ou en morceaux, cuits dans un sirop de sucre. Une gelée est une préparation obtenue uniquement avec le jus ou extraits aqueux des fruits, sans trace de pulpe. Une marmelade est une préparation de fruits réduits en pulpe, purée, jus, extrait aqueux, écorces, par la cuisson avec le sucre.

Pâte de fruits : friandise molle très sucrée faite de fruits.

Fruits confits : confiserie faite de fruits trempés dans des solutions de sucre puis glacés ou givrés.

Conservation par séchage : le séchage ou déshydratation consiste, par une action combinée libre de chaleur et de ventilation, en l'élimination poussée de l'eau contenue dans le fruit ou le légume, jusqu'à atteindre une teneur en eau compatible avec une conservation à long terme. Le séchage confère aussi au produit une facilité de réduction en poudre et une facilité de stockage supérieures.

La teneur en eau résiduelle des fruits séchés ne doit en général pas dépasser 23 - 24%. Lorsque les fruits déshydratés sont destinés à être réduits en farine, leur teneur en eau finale est plus faible (de l'ordre de 8 à 10%). La teneur en eau des légumes séchés est de l'ordre de 5 à 15%.

Traditionnellement, le séchage est réalisé par exposition directe des produits au soleil. Il s'agit d'un séchage par rayonnement et convection, très économique, mais présentant cependant des inconvénients considérables quant à la qualité nutritionnelle et hygiénique des produits séchés (dégradation des vitamines, dépigmentation des légumes, brunissement, contamination par la poussière ambiante, contamination dues aux insectes, aux oiseaux et aux rongeurs).

Différents types de séchoirs améliorés ont été conçus. On peut citer : les séchoirs à crib abrité, les séchoirs à claies sur rails, les séchoirs armoire à ventilation éolienne, les séchoirs à capteur solaire, les séchoirs tunnel etc.

Conservation par le froid : la conservation des fruits et légumes par le froid se fait surtout par congélation ou par surgélation. La conservation par le froid est l'une des méthodes utilisées pour

maintenir les qualités nutritionnelles des fruits et légumes. Elle permet de préserver la saveur naturelle, la couleur et les constituants volatils des fruits et légumes, mieux que la stérilisation et la déshydratation. C'est la meilleure méthode de conservation de jus concentré d'agrumes et d'ananas, ainsi que de beaucoup d'autres produits. Mais dans les pays en développement, la conservation par le froid est très peu utilisée parce que trop coûteuse.

Conservation par irradiation : le traitement des fruits et légumes par irradiation est un procédé récent. Si les radiations permettent de détruire tout ou une partie des micro-organismes présents dans l'aliment et d'inhiber ou retarder des processus physiologiques, les modifications chimiques qui peuvent être produits au sein des denrées alimentaires sont encore insuffisamment connues. L'irradiation pourrait être utilisée pour prolonger la durée d'entreposage à la température ordinaire de certains fruits tropicaux.

Elle est utilisée aussi pour inhiber de façon durable, la germination des pommes de terre, des oignons et des carottes.

Conservation par atmosphère contrôlée : la conservation des fruits et légumes fait aussi appel à la modification de l'atmosphère des entrepôts en agissant sur la teneur en oxygène, en anhydride carbonique et en azote. Par exemple, des atmosphères de 10 à 15% d'oxygène et de 0 à 2% de CO₂ ont permis de prolonger jusqu'à 8 mois la durée de conservation des agrumes.

En effet, une baisse de la teneur en oxygène ou un excès de CO₂ de l'atmosphère ambiante ralentit l'intensité respiratoire et la plupart des réactions de maturation, mais il n'est pas indiqué que la teneur en oxygène descende en dessous de 2 à 4% : le produit acquiert une saveur alcoolique due aux conditions d'anaérobiose ainsi créées. De même, l'emploi d'anhydride carbonique à des doses dépassant 5 à 10% et pendant des durées prolongées à basse température, peut provoquer ou aggraver certaines altérations. Exemple : la banane acquiert une saveur anormale.

En pratique, on joue à la fois sur la teneur en CO₂ et la teneur en O₂, en fonction de la variété, de la date de récolte, du pré-traitement de maturation etc.

Les atmosphères contrôlées sont intéressantes pour la conservation de beaucoup de fruits, mais en ce qui concerne les fruits tropicaux, les études n'ont pas été approfondies et les applications industrielles sont très rares et coûteuses.

6.6 La sucrerie

De préférence l'usine est située au centre de la région des plantations afin de réduire le temps de transport des cannes à la sucrerie.

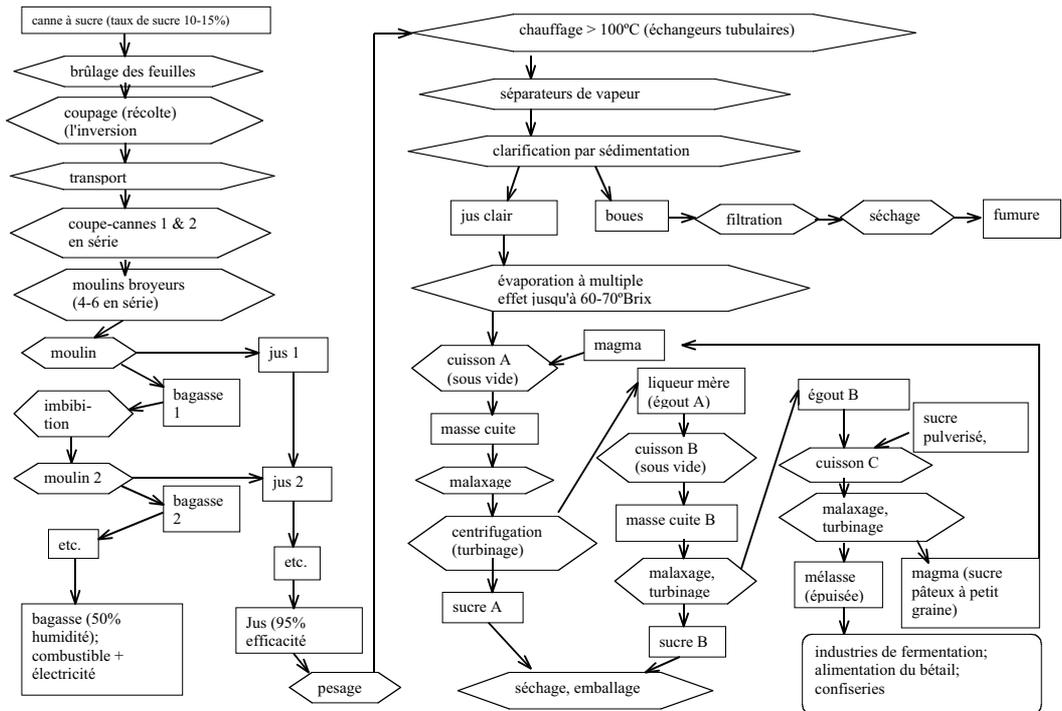
6.6.1 Moulins

Le conducteur de cannes comprend une partie horizontale et une partie inclinée, montant vers les moulins (Figure 6.6.1). Aussitôt

après le changement de pente, il passe sous un coupe-canne : c'est un arbre tournant à 500 - 750 t/minute et portant des couteaux qui frappent la masse des cannes dans le sens dans lequel elles avancent. Il coupe les cannes en morceaux et transforme l'entremêlement de tiges en une couche uniforme. Il est généralement suivi par un second coupe-canne, plus puissant ou plus rapide, et portant plus de couteaux, qui divise encore la masse et, réglé plus près du fond, achève de couper les tiges laissées intactes au fond par le premier coupe-canne. La couche dense et uniforme finalement obtenue est prise beaucoup plus facilement par les moulins que la masse de tiges entremêlées, avec ses intervalles et ses vides.

La masse ainsi préparée arrive aux moulins. Un moulin est un ensemble de trois cylindres, disposés comme les feuilles d'un trèfle, un supérieur et deux inférieurs. La masse de cannes est écrasée au passage et le jus coule sous le moulin. La canne écrasée, ou bagasse de premier moulin, est reprise par un conducteur intermédiaire et conduite au moulin suivant. Les batteries de moulins comprennent en général 4, 5 ou 6 moulins, mais, dès le second moulin, il n'y a plus que très peu de jus à escompter d'une nouvelle pression. On a donc recours à l'imbibition, qui consiste à arroser la couche de bagasse avec de l'eau ; elle est absorbée par la bagasse, dilue le jus qu'elle contient, et est extraite ainsi enrichie au moulin suivant. Les cylindres sont creusés de rainures circulaires, qui permettent une meilleure prise de la canne ou de la bagasse.

Figure 6.6.1
Diagramme technologique de la sucrerie



La bagasse finale est à environ 45 à 50 % d'humidité : elle n'en constitue pas moins un combustible suffisant et précieux, dépassant les besoins de la sucrerie.

L'extraction, ou efficacité des moulins, est de l'ordre de 95 % du saccharose de la canne, et varie suivant la lignine de celle-ci, le nombre de moulins, la proportion d'eau ajoutée en imbibition (20 à 35 % du poids de canne), l'état du matériel et la compétence du personnel.

6.6.2 Clarification

Le jus obtenu représente environ 100 % du poids de canne, suivant le taux d'imbibition. On le pèse (Figure 6.6.1) sur une balance automatique, afin de pouvoir contrôler la richesse des cannes et le travail de l'usine. On le chauffe au lait-de-chaux, en portant son pH aux environs de 7,8. On le pompe ensuite à travers les réchauffeurs jusqu'au clarificateur. Les réchauffeurs sont des échangeurs de chaleur tubulaires. Etant à une température légèrement supérieure à celle de l'ébullition, le jus traverse un séparateur de vapeur dans lequel il libère brusquement son excédent de chaleur sous forme de vapeur, et entre à 100 °C dans le clarificateur. Celui-ci est un grand récipient divisé en plusieurs étages ou compartiments, que le jus traverse, et de surface suffisante pour que la vitesse de progression du jus ne gêne pas la décantation du précipité formé au chaulage. Le jus clair est soutiré à la partie supérieure des compartiments tandis que les boues s'accumulent au fond, d'où elles sont extraites par gravité ou par pompage. Le volume qui s'ensuit pour le clarificateur correspond à une durée de séjour du jus allant d'une heure et demi à trois heures suivant la difficulté de la décantation. Le séjour le plus court est évidemment le plus souhaitable, en raison de l'inversion indésirable du saccharose en glucose et en fructose. Le jus clair va à l'évaporation (Figure 6.6.1). Les boues sont envoyées au filtre. Elles sont séchées et constituent une excellente fumure.

6.6.3 Evaporation

L'évaporation se fait à multiple effet dans des "caisses" alignées en batteries. Ce sont des échangeurs tubulaires (Figure 6.6.2) avec un grand espace libre au-dessus du faisceau tubulaire (Figure 6.6.3). Le jus à concentrer bout dans les tubes de la première caisse qui sont entourés à l'extérieur par de la vapeur. La vapeur du jus obtenu est envoyée au faisceau de la seconde caisse, pendant que le jus concentré passe à son tour de la première à la deuxième caisse, et ainsi de suite au travers de 4 ou 5 caisses. Un régulateur automatique maintient le sirop sortant de la dernière caisse au Brix voulu (c'est-à-dire au degré de concentration voulu). On arrête l'évaporation un peu avant le point auquel les cristaux se forment, soit à un Brix de 60 à 70.

Figure 6.2
Évaporateur à
couche mince à flux
descendant
(effet simple)

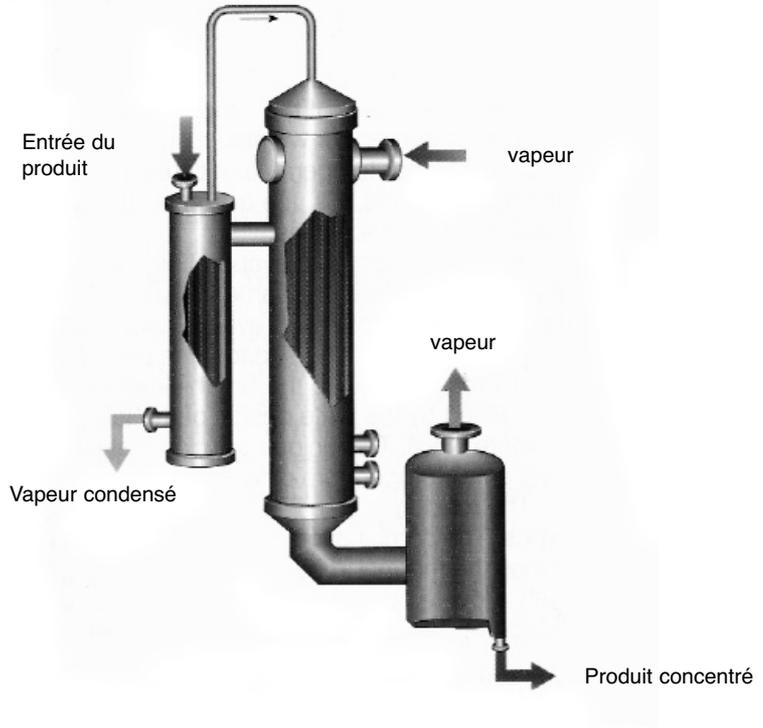
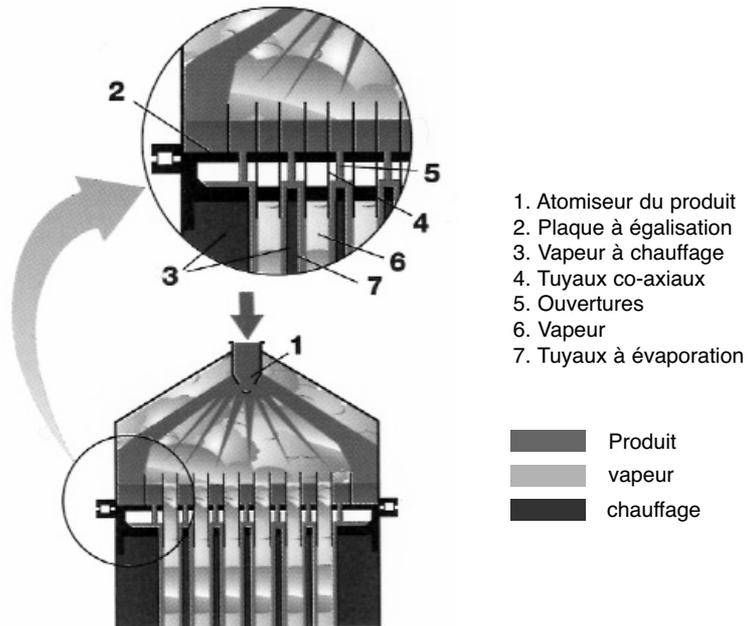


Figure 6.3
Section supérieure
d'un évaporateur à
couche mince à flux
descendant



6.6.4 Cuisson

La cuisson est la seconde phase de la concentration, au cours de laquelle on forme le grain et on le grossit. L'opération la plus délicate de la fabrication s'effectue sous vide, à simple effet, dans un appareil à cuire : c'est une caisse d'évaporation modifiée pour concentrer une matière très visqueuse et très consistante ; elle a pour cela de gros tubes, dans lesquels monte la masse cuite, et un espace vide important dans lequel elle redescend, et qui peut être un puits central ou un anneau périphérique. Une construction différente est montrée par la figure 6.6.4.

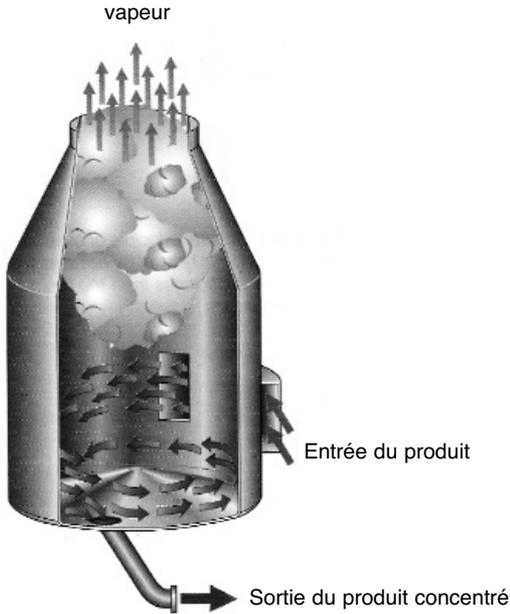


Figure 6.6.4
Courant du produit
dans une chambre
à vide

On admet d'abord un magma contenant de petits cristaux, et dont nous verrons l'origine, qui va couvrir jusqu'à la plaque supérieure du faisceau. On "monte" alors la cuisson en l'alimentant avec du sirop de façon à maintenir une certaine sursaturation optimale grâce à laquelle le cristal grossit aux dépens du sirop. On "lâche" alors le produit cuit dans les malaxeurs. Cette opération s'appelle "la cuisson A". La masse cuite A, après malaxage, est turbinée : le sucre A est séché et mis en sachet ou en vrac. La liqueur-mère, ou égout A, est renvoyée en bac d'attente auprès des appareils de cuisson. Cet égout A est encore très riche. On l'utilise, comme on a fait pour le sirop, pour monter la cuisson à partir d'un magma de petits cristaux. L'opération est identique et la masse cuite B, après malaxage et turbinage, fournit le sucre B et l'égout B. Cet égout B est encore riche. Dans des appareils permettant une cuisson particulièrement soignée, on introduit un mélange de sirop et d'égout A. On le concentre, et lorsqu'il a atteint la sursa-

turation voulue, on l'ensemence avec un bol de sucre très finement pulvérisé. On grossit ce grain soigneusement en évitant de laisser se former une seconde génération, qui donnerait du faux grain ou des cristaux plus petits ; on rentre dans l'appareil de l'égout B (Figure 6.6.1) et on termine cette masse cuite C comme les précédentes, à cela près qu'elle est bien plus délicate et demande beaucoup plus de temps. Après malaxage, elle fournit comme liqueur-mère la mélasse, qui est censée être épuisée, et comme sucre un sucre pâteux, à petits grains, qui, réempâté avec de l'eau, du jus ou du sirop, donnera un magma servant de pied-de-cuisson aux cuissons A et B (système du simple magma) ou aux seules cuissons B (système du double magma, dans lequel le sucre B sert à son tour de pied aux cuissons A).

6.6.5 Malaxage

Les malaxeurs ordinaires, dits "pétrins", sont avantageusement remplacés par des malaxeurs-refroidisseurs. Ce sont des cuves analogues, mais dans lesquelles tournent des serpentins à l'intérieur desquels circule de l'eau tiède : ces malaxeurs à circulation d'eau font gagner beaucoup de temps et de place. Dans les malaxeurs, les cristaux continuent à se nourrir aux dépens de la liqueur-mère, dont la sursaturation est plus ou moins maintenue du fait de la baisse de température.

6.6.6 Centrifugeuses

Le turbinage s'effectue dans desessoreuses centrifuges, de préférence automatiques. Les centrifugeuses continues tendent à remplacer ces appareils très complexes : elles sont beaucoup plus simples et économiques, mais ne fournissent pas un épuisement aussi complet, et il convient de mettre en balance l'économie qu'elles apportent avec la perte supplémentaire de sucre qu'elles laissent dans la mélasse.

6.6.7 Séchage

Le sucre est passé au travers d'un sécheur-refroidisseur à cylindre rotatoire.

6.6.8 Livraison

Après le séchage, on enlève les cristaux de mauvaises dimensions par tamisage. Les cristaux de la dimension désirée sont emballés en sacs de 50 ou de 100 kg.

6.7 Les boissons alcoolisées

6.7.1 Introduction

La fermentation alcoolique est une vieille technique de production de boissons désaltérantes connue depuis la plus haute antiquité. En effet l'éthanol est un agent efficace de conservation lorsque sa concentration est suffisante. En outre, il n'est pas réellement toxique pour l'homme à doses modérées (moins de 0,6 g/kg/jour). Quelques exemples de boissons alcoolisées sont résumés dans le tableau 6.7.1. On distingue globalement deux catégories de boissons alcoolisées :

- Les boissons fermentées obtenues par action de certaines levures sur les glucides de divers jus (raisins, pommes) ou des céréales.
- Les boissons distillées obtenues par distillation de moûts fermentés : eau de vie, cognac, calvados, rhum, vodka, whisky, sodabi, etc. Le degré alcoolique de ces boissons est généralement très supérieur à celui de la bière ou du vin.

Matière première	Procédé	Produit
jus de fruits sucrés	fermentation alcoolique	vins
céréales, autres sources d'amidon	brassage, fermentation alcoolique	bières
vins	distillation, maturation	eau de vie, cognac ogogoro, etc.
« bières » d'orge, du blé, du maïs	distillation, maturation	whisky, chang'aa, etc.
	distillation en présence d'herbes, épices	genièvre, gin, etc.
pommes de terre	brassage, fermentation alcoolique, distillation, purification	vodka
Vin de palme	fermentation, distillation	sodabi

Tableau 6.7.1
Quelques exemples de boissons alcoolisées

6.7.2 Un exemple : La fabrication de la bière

C'est une boisson très ancienne qui est aujourd'hui fabriquée dans la plupart des pays du globe. Elle est obtenue à partir de moûts amylicés, en trois phases principales :

6.7.2.1 Maltage

Il a pour but principal le développement des enzymes, surtout de la β -amylase dans les céréales utilisées. Cette enzyme saccharifiante hydrolyse les chaînes d'amylopectine à partir de leur extrémité non réductrice en libérant du maltose. Il se forme également des « cytases » qui désagrègent les membranes et des protéases qui libèrent des acides aminés assimilés d'abord par l'embryon du grain et qui serviront plus tard au développement de la levure lors de la fermentation. Les céréales utilisées sont généralement l'orge, le sorgho, le mil, le riz. En principe, seules les variétés cultivées spécialement pour le brassage sont utilisées. Le maltage favorise également la friabilité du grain et contribue à la saveur finale de la bière.

Le grain (l'orge par exemple) est d'abord nettoyé, trempé dans l'eau pendant environ 1 à 4 jours puis mis à germer pendant 5-7 jours. Cette germination active la synthèse d'enzymes amylolytiques, protéolytiques et des phosphatases, etc. Le grain germé subit ensuite le « touraillage » qui correspond au séchage du grain germé sous un courant d'air chaud et à l'arrêt de la germination. Les radicules sont ensuite éliminées par polissage du grain germé et séché qui subit enfin une mouture grossière. Le « malt » ainsi obtenu a une activité enzymatique élevée et l'amidon et les protéines ont été partiellement modifiés.

6.7.2.2 Brassage

Le but du brassage est l'hydrolyse de l'amidon. Le malt concassé subit l'empâtage : il est mis en suspension dans des « cuves matières » autrefois en cuivre et aujourd'hui en acier inoxydable contenant de l'eau. La suspension est mélangée et chauffée par paliers d'abord à 45°C correspondant à l'optimum d'activité pour l' α -amylase, ensuite à 55°C correspondant à l'optimum de température pour les protéases et enfin à 65°C correspondant à l'optimum de température pour la β -amylase.

Le mélange est ensuite filtré pour éliminer les résidus insolubles ou « drèches » qui sont destinés à l'alimentation du bétail.

Environ 150 à 400 g de cônes de « houblon » (fleurs femelles de *Hupulus lumulus*, contenant des résines amères et anti-microbiennes) par hectolitre sont ajoutés au moût et le mélange est bouilli pendant quelques heures pour extraire les résines de houblon dans le moût. Pendant cette ébullition le moût est stérilisé ; les protéines précipitent et le moût est concentré par évaporation contrôlée. Les protéines coagulées sont éliminées par une deuxième filtration ou par centrifugation et le jus est refroidi à 6-8°C. Ce jus est appelé « moût doux ».

6.7.2.3 Fermentation

Le « moût doux » estensemencé en utilisant 10^6 - 10^7 cellules vivantes de *Saccharomyces cerevisiae* / ml de moût. La fermentation se fait en deux temps :

- Fermentation principale : pour la bière « lager » à une température de 6-8°C pendant 7 jours. Les levures sédimentent par floculation après le maximum de fermentation. En ce qui concerne la bière anglaise « Ale » la fermentation se fait à 15-16°C pendant 2-3 jours ; les levures flottent à la surface de la bière après la fermentation. Pendant la fermentation principale, la plupart des saccharides fermentescibles sont transformés ; le CO_2 produit est récupéré pour diverses utilisations (embouteillage de la bière, production des boissons gazeuses, etc.). La bière issue de la fermentation principale est appelée « bière jeune ».

- Fermentation secondaire ou maturation ou « garde » : la bière est décantée dans des tanks hermétiques à une température de 0-2°C pendant 6-8 semaines. Pendant cette phase, les sucres résiduels fermentent et la bière s'enrichit en gaz carbonique. La bière est ensuite filtrée sur Kieselguhr avant d'être pasteurisée à 60-65 °C.

La fermentation alcoolique a lieu pour toutes les bières, même les bières dites sans alcool qui en réalité, en contiennent de 0,5 à 1 % (v/v) d'éthanol.

6.7.2.4 Conditionnement

La bière est conditionnée sous diverses formes :

- La bière est mise en bouteille et pasteurisée à 60-65°C, puis étiquetée, mises en caisse et distribuée.
- La bière est pasteurisée en continue dans un échangeur de chaleur, et elle est mise dans des bidons de 40-50 litres en aluminium.
- La bière non pasteurisée est mise dans des bidons de 40-50 litres en aluminium ou dans des camions tankers en vrac et distribuée.

PRODUITS D'ORIGINE ANIMALE

6. 8 La viande et le poisson

6.8.1 La viande

La viande de boucherie et de charcuterie proviennent du boeuf, du veau, du porc, de la volaille, du mouton, de l'agneau, du cheval et des abats comestibles.

Comme illustré par le tableau 6.8.1, la viande a pour principal intérêt nutritionnel l'apport en protéines et en fer. La teneur en protéines est en moyenne de 16-20 grammes pour 100 g de viande (avant cuisson). Les viandes contiennent des vitamines du groupe B et la vitamine A.

Ils ont des modes de conservation divers à savoir :

L'utilisation du froid : la réfrigération est très importante dès l'abattoir. La carcasse est refroidie en quelques heures de 38°C à 5°C. Aussi, le transport au grossiste et au détaillant sera à l'état refroidi, ainsi que le stockage. La durée de stockage maximale lorsque la viande est conservée entre 0 et 5°C est de quelques jours. La flore psychrophile (*Pseudomonas* spp.) est capable de se multiplier à ces températures et de détériorer la viande par voie enzymatique. Lorsque la viande est congelée à -20°C, la durée de stockage est de quelques semaines. La surgélation (congélation rapide par

l'application d'azote liquide) pose quelques problèmes de détérioration incluant le séchage de la surface de la carcasse et la croissance lente de moisissures noires (décoloration).

Tableau 6.8.1
Composition chimique globalisée de la viande

par 100 g de viande fraîche		
eau (g)	60 - 70	
glucides (g)	-	glycogène → acide lactique post-mortem
protéines (g)	16 - 20	
fer (mg)	3 - 5,5 boeuf 1,5 - 2,3 porc/mouton 1 - 2 poulet	40 % du fer sous forme hémunique (25 % biodisponibilité); fer non-hémunique bio-disp < 5 %
lipides (g)	7 boeuf 17 mouton 2 - 3 cheval/poulet	la composition des lipides (acides gras polyinsaturés) est fortement influencée par l'alimentation du porc
cholestérol (mg)	variable: porc 70 - 100 foie 340 cervelle 2100!!	

L'utilisation de la chaleur : elle se fait soit par cuisson simple : dans ce cas, on doit la combiner avec un stockage réfrigéré ; soit par pasteurisation (semi-conserves) : l'effet de la chaleur est renforcé par l'application du sel, des épices, de la nitrite, etc. Le stockage réfrigéré est quand même nécessaire ; soit par appertisation (stérilisation) : la mise en boîte suivie par l'autoclavage (121°C, 40-60 minutes pour obtenir la « cuisson botulinum » 12D (Cf. 4.2.2).

La déshydratation avec ou sans fumage

Le salage : NaCl + NaNO₃ (salpêtre) avec l'action conservatrice de la nitrite (formation de nitrosomyoglobine et nitrosohémochrome)

La fermentation lactique : saucisses fermentées (exemple : le salami). Le principe du procédé est résumé sur la figure 6.8.1.

6.8.2 Le poisson

La composition chimique globale du poisson est présentée au tableau 6.8.2. Le poisson frais se détériore très rapidement, à cause des enzymes digestives et des enzymes des muscles (cathepsines) du poisson, des microbes et de leurs enzymes.

Les traitements à bord du poisson frais sont les suivants : ouverture ventrale, éviscération, enlèvement du sang, lavage et stockage (sur glace, ou par congélation).

Les poissons sont conservés en utilisant des techniques diverses : Mise en boîte (sardines, thon, hareng, etc. à l'huile, sauce de tomates, saumure)

Tableau 6.8.2
Composition chimique globale du poisson

par 100 g de poisson frais	poisson gras	poisson non-gras
protéines (g)	20	16,4
lipides (g)	10	0,5
Ca (mg)	40	25
Fe (mg)	1,2	0,7
Energie (J)	753	314

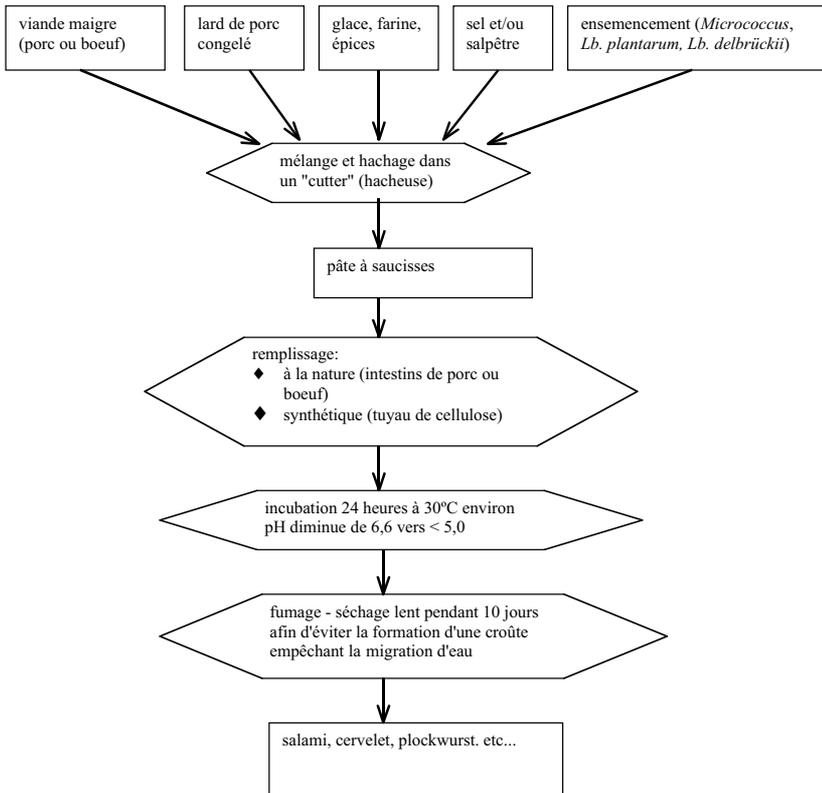


Figure 6.8.1
Diagramme de pro-
duction de saucisses
fermentées

- découpage (tête, queue, viscères; filetage, tranches, entier)
- nettoyage
- saumure (5-10% de sel, 30 minutes)
- pré-cuisson (15 minutes à la vapeur à 100°C)
- remplissage des boîtes
- addition de jus (saumure, sauce, huile; nitrates à stabilisation de couleur)
- exhaustion
- sertissage
- autoclavage : 120°C pendant 50-80 minutes
- refroidissement
- étiquetage
- stockage pendant environ 6 mois : améliore le goût (interaction poisson-jus)

Séchage

(le ratio volume / poids de transport est minimal; le séchage solaire est très économique)

- préparations (nettoyage etc. voir ci-dessus)
- séchage à l'air ambiant : de préférence, on protège le poisson des rayons solaires directs (dommage aux lipides, couleur, etc.)
- triage

- écaillage
- incisions
- étripage
- étêtage
- lavage/nettoyage

En Afrique de l'Ouest, le poisson fermenté-séché est populaire

- trempage 24-48 h jusqu'au début de la putréfaction (goût fort et caractéristique)
- exposition (séchage)
 - pendant la journée : côté chair vers le soleil
 - pendant la nuit : renversé; petites/moyennes dimensions : 4-8 jours; gros (Capitaine) 2-3 semaines
- stockage; emballage en nattes (pas toujours efficace ...)
- *séchage industriel* : tunnel à séchage (Cf. Figure 4.4.8)

Fumage traditionnel (Mali et autres pays de l'Afrique de l'Ouest)

- triage
- préparation : écaillage, étripage, incisions, tranchage, lavage, égouttage, nettoyage des claies du four
- pré-séchage (au four); 2-4 h à des températures relativement basses
 - séchage partiel
 - durcissement de la peau
- cuisson : augmenter la température quand la peau est dure
- fumage : augmenter la production de fumée; pendant le fumage, on fait le contrôle de la texture et de la couleur (doivent être uniformes)
- stockage (dans un four de stockage)
- ré-fumage (en cas d'humidité ou de problèmes avec les insectes).

Salage :

Salage sec avec drainage : 100 kg poisson + 50 kg sel en couches. Le poisson est séché graduellement parce qu'on permet à la saumure de s'échapper. Ce traitement constitue une combinaison du salage et du séchage.

Salage avec du sel sec, sans drainage : Une saumure est formée couvrant les poissons. Après une incubation de longue durée la sauce de poissons est formée (par exemple le Nuoc-Mam du Vietnam).

Traitement à la saumure (10-20% de sel) pour quelques jours. En combinaison avec la pasteurisation pour la fabrication des semi-conserves.

Froid :

Congélation à bord (poissons de mer). Il est très important d'avoir à sa disposition l'infrastructure d'une « chaîne froide ».

6.9 Les produits laitiers

6.9.1 Introduction

Le lait cru est la base de tous les produits laitiers montrés au tableau 6.9.1. Ces produits sont très différents du point de vue du processus de fabrication, de leur structure, leur composition et leurs caractéristiques. Une grande variété de traitements sont appliquées au lait au cours de l'élaboration des produits laitiers. Le lait pasteurisé par exemple est un produit dans lequel le lait cru est peu modifié, alors que le fromage est du lait avec beaucoup plus de modifications.

Dans la composition, il y a une variabilité due au type d'animal (vache, brebis, chèvre, chameau), à l'alimentation des animaux et à la saison. Le lactose est le seul glucide important dans le lait ; la caséine forme 80 % de la protéine.

Teneur pour 100 g	Lait entier	Lait écrémé en poudre	Beurre	Yaourt	Fromage double crème
kJ	250-265	1453	3098-3152	155-460	1423-1528
eau (g)	88	4	15-20	73-88	46-52
protéines (g)	3,4	35,5	0-0,7	4,2-5	7,7-17
lipides (g)	4	0,8	82-83,5	0,3-3,5	32-33,5
glucides (g)	4,5-4,8	52,8	0-0,4	4-18	0,2-2,4
cholestérol (mg)	14	3	250	1-13	100
Na (mg)	45	680	22-870	45-65	582-1067
Ca (mg)	120	1300	10-15	148-170	102-350
Fe (mg)	0,1	0,5	0-0,2	0,1-0,2	0,8-1,4
vit. A (u.i.)	10-50	0	700-900	0-30	277-385
vit. D (µg)	0-0,1	0	0,8-8	0,01-0,04	0,2-0,4
vit. E (µg)	0,1	0	1,5-10	0,03-0,1	0,6
vit. B12 (µg)	0,2-0,5	3	0	0-0,4	0,3-2,6

Tableau 6.9.1
Composition de quelques produits laitiers

6.9.2 Aspects microbiologiques

Le lait cru renferme de nombreux germes dont le développement rapide est assuré par sa température à la sortie de la mamelle. Si le lait n'est pas refroidi immédiatement en dessous de 4 °C, sa population microbienne peut atteindre plusieurs millions de germes par millilitre au moment de la livraison. Le tableau 6.9.2 illustre l'influence importante de la température de stockage et le niveau initial de la contamination, sur la croissance microbienne. C'est pourquoi le respect des règles d'hygiène est très important. Il est important que les mains ou les machines à traire soient propres. En particulier, les machines doivent être nettoyées après

Nombre initial de germes (par ml)	Température (°C)	Nombre de germes	
		après 24 h	après 48 h
4000	4	4 000	4 000
	10	12 000	120 000
	16	1 500 000	18 000 000
40 000	4	80 000	120 000
	10	200 000	840 000
	16	4 500 000	102 000 000

Tableau 6.9.2
Le développement microbien dans le lait.

chaque traite et démontées périodiquement. Tous les récipients contenant le lait comme les pots, les tanks de refroidissement doivent être nettoyés correctement.

Quand le nombre de bactéries atteint 10^7ml^{-1} , on dit que le produit est détérioré. Dans ce cas, un traitement technologique sera difficile parce que le lait sera tellement déstabilisé qu'il se caillera pendant le chauffage.

Les plus importants microbes sont les suivants :

- Les bactéries lactiques : Celles-ci transforment le lactose dans le lait en glucose et en galactose, puis en acide lactique. La température favorable pour ces bactéries est 30 - 40 °C. Quand la teneur en acide lactique atteint 6 à 7 g par litre, les protéines du lait (la caséine) coagulent et le lait "tourne".
- Les microbes saprophytes divers : ces bactéries peuvent être nombreuses si l'extraction du lait n'a pas été faite avec soin. On distingue :
 - des bactéries coliformes (indice de pollution en raison de leur origine fécale); parmi elles, se trouve *Escherichia coli*, qui peut provoquer de la diarrhée.
 - des bactéries protéolytiques, qui causent la détérioration par formation de mauvais goûts.
 - des bactéries lipolytiques, qui attaquent les matières grasses et causent le rancissement.
 - des microbes pathogènes : *Brucella abortus*, *Mycobacterium* spp., *Streptococcus* spp., *Staphylococcus* spp., *Salmonella typhi*, *Campylobacter jejuni*, *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes*. La plupart des microbes pathogènes sont détruits par la pasteurisation.

6.9.3 Lait pasteurisé conditionné

Un chauffage à 72°C pendant 15 - 20 secondes appliqué de façon continue dans un échangeur de chaleur détruit tous les germes pathogènes. Si le lait concerné est propre et ne contient pas beaucoup de germes saprophytes banals, la flore résiduelle constituée par les micro-organismes thermorésistants sera faible et le lait pasteurisé est de bonne qualité. En cas d'une forte contamination, une température de 85 - 90°C pendant 15 - 20 secondes peut être nécessaire pour réduire suffisamment le nombre de bactéries résiduelles, mais dans ce cas il y a aussi une détérioration du goût du lait.

Avant de pasteuriser le lait, on peut l'homogénéiser, afin d'éviter la séparation de la matière grasse pendant le stockage.

Subordonné aux législations nationales et les sortes du lait, le lait pasteurisé doit avoir moins de 3×10^4 germes banals / ml en principe; les coliformes fécaux doivent être absents / 1 ml. Souvent, le lait entier doit avoir 3,6 % de matières grasses, le lait demi-écrémé, 1,5-1,8 %. La durée maximale de stockage du lait pasteurisé est d'une (1) semaine environ au réfrigérateur.

Le procédé général :

Lait → réglage de la matière grasse → homogénéisation (Cf. Figure 3.6.11) → pasteurisation (Cf. Figures 4.2.13 et 4.2.16) → emballage aseptique (Cf. Figure 4.2.7).

6.9.4 Le lait stérilisé

La stérilisation consiste en un chauffage énergique destiné à détruire tous les micro-organismes du lait en vue d'assurer une longue conservation. Le résultat peut être obtenu par deux méthodes : le procédé conventionnel et le procédé par ultra haute température (UHT).

Quelle que soit la méthode, il faut que le lait soit homogénéisé avant la stérilisation, pour éviter la séparation de la matière grasse au cours de la conservation.

En utilisant le procédé conventionnel, le lait est chauffé dans des conditions *d'autoclavage*, soit 15-20 minutes à 115-120 °C, ou 8-10 minutes à 125-130 °C. Le lait est préalablement conditionné en récipients hermétiques comme les bouteilles en verre ou en matière plastique.

Le procédé UHT consiste en un chauffage instantané du lait, en flux continu, à 140-150 °C pendant 2-3 secondes, suivi d'un conditionnement aseptique dans des récipients stériles, par exemple, emballage en carton ou en matière plastique de formes diverses.

Dans les pays tempérés, la conservation du lait stérilisé est assurée pendant plusieurs mois à la température ambiante, à condition que les récipients ne soient pas ouverts. Dans les pays chauds, il est souhaitable de le conserver au frais. On observe des modifications d'ordre biochimique au cours de la conservation, surtout si la température est supérieure à 15 °C.

Autrefois, le lait stérilisé était un lait profondément modifié dans sa composition, sa structure et sa valeur nutritionnelle par le traitement thermique. Aujourd'hui les progrès réalisés par les techniques et le matériel de stérilisation permettent de limiter considérablement les modifications enregistrées. Le lait stérilisé, en particulier par le procédé UHT, conserve sa teinte blanche initiale et sa valeur nutritionnelle est respectée (Cf. 4.2.3).

6.9.5 Laits concentrés

Le lait concentré se présente sous deux formes : sucré et non sucré comme indiqué au tableau 6.9.3. Le lait est concentré sous vide par évaporation partielle d'eau. Dans le cas du lait concentré non sucré, 45 % de l'eau est évaporée et la conservation est assurée par la stérilisation à l'autoclave. Le produit reste liquide. Dans le cas du lait concentré sucré, 75 % de l'eau est évaporée et la conservation est assurée par l'addition de 40-42 % de sucre. Le produit devient pâteux. Pour éviter tout accident de fabrication, il faut que le lait cru soit d'excellente qualité et d'une grande fraîcheur.

Tableau 6.9.3

Différences entre le lait concentré sucré et le lait non sucré

Lait concentré - sucré	Lait concentré - non sucré
- addition d'un sirop de saccharose stérile (40-42% du produit fini)	- addition de sels stabilisants (0,2% Na-phosphate) pour éviter la coagulation favorisée par les ions calcium pendant la stérilisation
- évaporation sous vide partiel à basse température (53-55°C) (75% de l'eau est évaporé)	- évaporation sous vide partiel (53-55°C) (45 % de l'eau est évaporé)
- conditionnement en boîtes métalliques	- conditionnement en boîtes métalliques ou en verre
	- stérilisation en autoclave 115-120°C, 20 minutes.

La préparation du lait comporte les étapes suivantes: triage (qualité), réglage du taux de matière grasse, pasteurisation (105-120°C, 10-15 sec) pour tuer les germes pathogènes, les germes banals et pour inactiver les enzymes, et enfin homogénéisation de la matière grasse.

Les progrès réalisés dans la technologie industrielle de l'évaporation permettent maintenant de limiter notablement l'action thermique sur le lait. La valeur nutritionnelle du lait concentré est très proche de celle du lait frais, notamment dans le cas du lait concentré sucré, qui ne subit pas une stérilisation.

6.9.6 Le lait en poudre

C'est du lait pratiquement sans eau (moins de 4 %; $a_w \approx 0,05$), qui ne peut donc plus être un siège de développement microbien.

Pour la fabrication, le lait est soumis à la même préparation que les laits concentrés. Le lait est ensuite soumis à une concentration préliminaire, puis à une dessiccation par pulvérisation sous la forme d'un fin brouillard dans une grande chambre parcourue par un courant d'air chauffée à 150-160 °C. L'évaporation de l'eau de concentration est immédiate; la température du produit est d'environ 60 °C. Les gouttelettes de lait tombent à la base de la chambre sous forme de fines particules (Cf. Figure 4.4.12). La poudre de lait entier est conditionnée à l'abri de l'air sous azote (N_2), pour éviter l'oxydation de la matière grasse. La poudre de lait maigre contient très peu de matières grasses.

6.9.7 Le lait fermenté

Le lait fermenté est fabriqué suivant un principe très ancien : la fermentation du lactose avec formation d'acide lactique, d'alcool ou de ces deux produits. En Europe, le yaourt (ou yoghourt) est le lait fermenté le plus consommé ; dans les pays de l'Est, c'est le kéfir, caractérisé par une fermentation alcoolique (~ 1 %), qui représente 70 % de la consommation totale du lait fermenté.

A part les produits principaux de la fermentation (acide lactique / alcool), d'autres produits sont formés : ce sont les substances aromatiques qui donnent au produit final ses caractéristiques organoleptiques spécifiques.

Le procédé général de production de yaourt est décrit comme suit:

1. Lait entier, demi-écrémé ou écrémé
 2. Augmentation de la matière sèche soit par évaporation partielle, soit par addition de lait en poudre écrémé, ou caséine en poudre, ou concentration par ultrafiltration.
 3. Pasteurisation et refroidissement à 45-50°C
 4. Ensemencement 2-3% (*Lactobacillus bulgaricus* + *Streptococcus thermophilus*)
 5. mise en pots
 5. mise en vaisseau
- incubation 45-50°C 2-3 h incubation 30°C 16-20 h jusqu'à la formation du coagulum (gel)
- refroidissement <5°C brassage en cuve, suivi par la fluidisation
- arrête l'acidification conditionnement en cartons ou plastique

Les caractères gustatifs du yaourt peuvent être modulés en agissant sur les conditions de la fermentation. On peut obtenir ainsi des produits plus acides ou plus doux. Le yaourt doit être conservé au réfrigérateur.

Il est généralement admis que le yaourt est à l'origine d'une stimulation des sécrétions digestives et qu'il assure une bonne digestibilité et un coefficient de digestibilité élevé pour de nombreuses substances, notamment les protéines et les minéraux. La présence de micro-organismes vivants, susceptibles d'intervenir sur l'équilibre de la flore intestinale, ou la résistance aux infections n'est sans doute pas sans signification. Le yaourt contient encore environ 3% de lactose ; cependant c'est un produit laitier convenable aux personnes qui ont une intolérance au lactose due à la présence de l'enzyme β -galactosidase.

6.9.8 Fromages

La dénomination fromage s'applique au produit, fermenté ou non, obtenu à partir du lait ou d'autres matières d'origine laitière coagulées avant égouttage ou après élimination partielle de la phase aqueuse. L'intérêt nutritionnel des fromages réside dans leur teneur en calcium, en protéines, et pour certains d'entre eux, en vitamines du groupe B. Fabriquer du fromage est une façon de conserver les protéines et les matières grasses du lait.

Une très grande variété existe, par exemple :

- fromage frais (fromage de campagne)
- fromage à pâte molle avec moisissures externes (brie, camembert)
- fromage à pâte molle à croûte lavée (munster, pont-l'évêque)
- fromage à pâte pressée non cuite (Cantal, Gouda, Port-Salut etc.)
- fromage à pâte pressée cuite (Comté, Emmenthal, Gruyère)

En général, la fabrication d'un fromage comprend trois étapes : en premier, c'est la formation d'un gel de caséine : elle se fait par caillage ou coagulation du lait par addition de présure. La coagulation est une opération qui vise à la séparation des constituants du lait qu'on souhaite soumettre à l'action des micro-organismes. La deuxième étape est la déshydratation partielle du gel : elle se fait par égouttage qui aboutit à un caillé. La dernière étape est la maturation du caillé par des enzymes dont les plus actives sont celles produites par les micro-organismes. C'est l'affinage du caillé qui conduit au fromage. Les étapes de fabrication d'un fromage à pâte dure (le Gouda) sont résumés par la figure 6.9.1. Quelques outils spécifiques sont illustrés par les Figures 6.9.2, 6.9.3, et 6.9.4.

Figure 6.9.1
Les étapes de fabrication du fromage à pâte dure

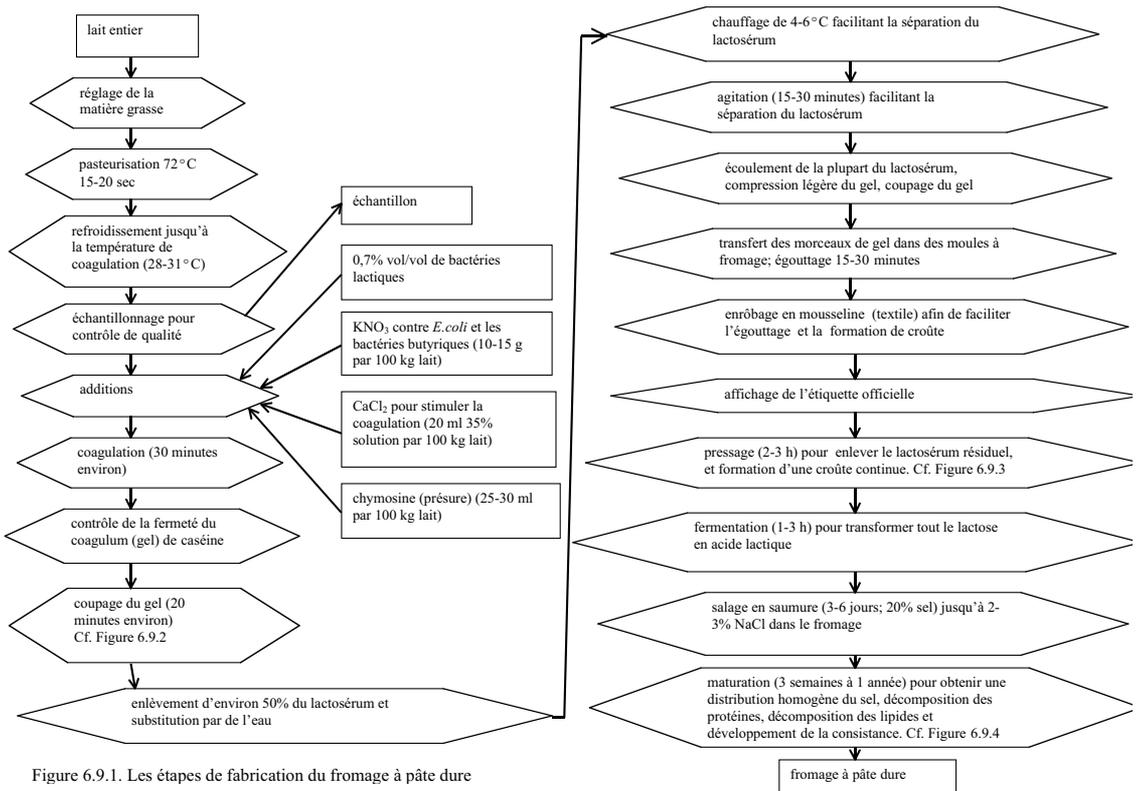


Figure 6.9.1. Les étapes de fabrication du fromage à pâte dure

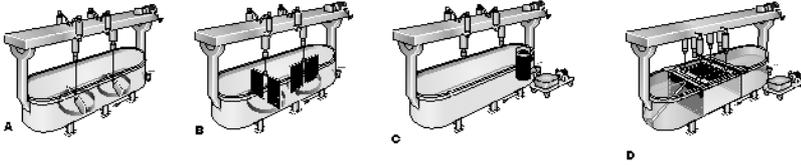
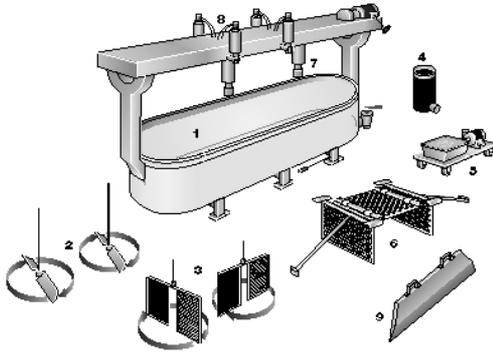


Figure 6.9.2
Vaisseaux conventionnels et outils de fabrication du fromage



- A. Vaisseau pendant le mélange
- B. Vaisseau pendant le coupage
- C. Vaisseau pendant l'écoulement du petit-lait
- D. Vaisseau pendant le pressage
- 1. Vaisseau fromage à double paroi avec poutre portante et moteur aux outils
- 2. Outil à remuer
- 3. Outil à couper
- 4. Passoire à placer dans l'écoulement du vaisseau
- 5. Pompe au petit-lait
- 6. Plaque à pressoir
- 7. Attachement des outils
- 8. Cylindres hydrauliques au pressoir
- 9. Coûteau au fromage

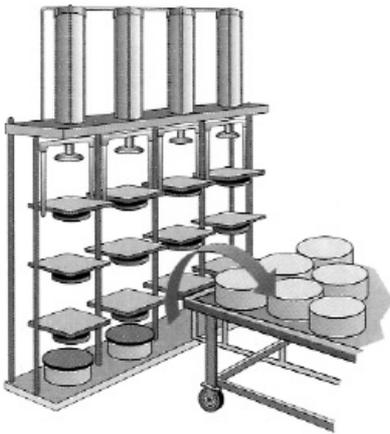


Figure 6.9.3
Pressoir-fromage vertical à action pneumatique



Figure 6.9.4
Stockage de fromage utilisant des palettes

GENERAL

- DUPIN, H.; CUQ, J.-L.; MALEWIAK, M.-I.; LEYNAUD, C.; BERTHIER, A.-M. [Ed] (1992) Alimentation et nutrition humaines. ESF éditeur .
- FAVIER, J.C.; IRELAND-RIPPERT, J.; TOQUE, C.; FEINBERG, M. (1996) Répertoire général des aliments. Table de composition. F-75384 Paris Cedex, France; Tec & Doc. Lavoisier. xxviii + 895pp. ISBN 2-85206-921-0.

(BIO)CHIMIE ALIMENTAIRE

- ALAIS, C.; LINDEN, G. (1995) Biochimie alimentaire. 75280 Paris Cedex 06, France; Masson. 244pp. ISBN 2-225-84556-5.
- BELITZ, H.D.; GROSCH, W. (1982) Lehrbuch der Lebensmittelchemie. Springer Verlag Berlin.
- CHEFTEL, J.C.; CHEFTEL, H. (1976, nouveau tirage 1992) Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Tome I. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. ISBN 2-85206-827-3. 381pp.
- CHEFTEL, J.C.; CHEFTEL, H.; BESANCON, P. (1977, nouveau tirage 1992) Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Tome II. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. ISBN 2-85206-828-1. 420pp.
- LARRETA-GARDE, V. [Ed] (1998) Enzymes en agroalimentaire. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. xviii + 380pp. ISBN 2-7430-0210-7.
- LINDEN, G.; LORIENT, D. (1994) Biochimie agro-industrielle. Valorisation de la production agricole. 75280 Paris Cedex 06, France; Masson SA. xvii + 367pp. ISBN 2-225-84307-4.
- OGUNTONA, E.B.; AKINYELE, I.O. (1995) Nutrient composition of commonly eaten foods in Nigeria - raw, processed and prepared. Food Basket Foundation Publication Series, Ibadan, Nigeria. ISBN 987-31106-3-2.

MICROBIOLOGIE ET HYGIÈNE ALIMENTAIRE

- AGMAR, A.; COIGNARD, M.; HERMON, C.; GUYADER, P.; LEITAO, J. [Ed] (1994) Auto-diagnostic de l'hygiène des entreprises agro-alimentaires & entreprises associées. Rue des Docteurs Calmette et Guerin, BP 49, 53020 Laval Cedex, France; ASEPT Editeur. 94pp. ISBN 2-908428-04-0.
- BOURGEOIS, C.M.; MESCLE, J.F.; ZUCCA, J. [Ed] (1996) Microbiologie alimentaire. I. Aspect microbiologique de la sécurité et de la qualité alimentaires. 2eme Edition. Technique et documentation Lavoisier. 11, rue Lavoisier F75384 Paris, France. ISBN 2-85206-451-0. 419pp.
- BOURGEOIS, C.M.; LARPENT, J.P. (1996) Microbiologie Alimentaire. Tome 2. Aliments fermentés et fermentations alimentaires. 2eme Edition. Technique et Documentation Lavoisier, Paris. ISBN 2-85206-517-7. 334pp.
- BRYAN, F.L. (1994) L'analyse des risques-points critiques pour leur maîtrise. Comment apprécier les risques liés à la préparation et à la conservation des aliments. Organisation Mondiale de la Santé (OMS) Geneve. ISBN 92-4-254433-7. 78pp.

- LARPENT, J.P. (1996) Les Listeria. F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. 144pp. ISBN 2-7430-0029-5.
- LECLERC, H.; MOSSEL, D.A.A. (1989) Microbiologie: le tube digestif, l'eau et les aliments. Doin Editeurs Paris, ISBN 2-7040-0590-7.
- MOLL, M.; MOLL, N. [Ed] (1996) Sécurité alimentaire du consommateur. F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. 320pp. ISBN 2-85206-994-6.

GÉNIE DES PROCÉDÉS

- ANON. (1994) Guide IA. Le guide des ingrédients, équipements et services pour l'industrie agro-alimentaire. Revue de l'Industrie Agroalimentaire. 8 Cité Paradis, 75493 Paris Cedex 10, France; Revue de l'Industrie Agroalimentaire. 230pp.
- BRUINSMA, D.H., WITSENBURG, W.W. & WÜRDEMAN, W. (1985). Selection of technology for food processing in developing countries. Pudoc - Wageningen.
- FELLOWS P. (1988). Food Processing Technology. Principle and practice - Ellis Horwood Ltf., Chichester, England.
- GERBOUIN-REROLLE, P. (1993) L'enfant en milieu tropical; Transformation des aliments: technologies et valeur nutritionnelle. Revue du centre international de l'enfance, Paris.
- LENIGER, H.A.; BEVERLOO, W.A. (1975) Food Process Engineering. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht, Pays-Bas, et Boston, Etats Unies. ISBN 90-277-0605-0. 552pp.
- MAFART, P. (1991) Génie industriel alimentaire. I. Les procédés physiques de conservation. F 75384 Paris Cedex 08, France; Technique et Documentation Lavoisier. viii + 295pp. ISBN 2-85206-707-2.
- MAFART, P.; BELIARD, E. (1992) Génie industriel alimentaire. II. Techniques séparatives. F 75384 Paris Cedex 08, France; Technique et Documentation Lavoisier. xi + 273pp. ISBN 2-85206-808-7.
- MAFART, P. (1998) Génie industriel alimentaire. Les procédés physiques de conservation. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. x + 335pp. ISBN 2-7430-0211-5.
- MULTON, J.L.; BUREAU, G. [Ed] (1998) L'emballage des denrées alimentaires de grande consommation. 2ème édition. F 75384 Paris Cedex 08, France; Technique et Documentation Lavoisier. 1120pp. ISBN 2-7430-0208-5.
- TREILLON, R.; LECOMTE, C. (1998) Gestion industrielle des entreprises alimentaires. 11, Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08; Lavoisier Tec & Doc. xiv + 466pp. ISBN 2-7430-0122-4.

ASPECTS DE CONSERVATION

- MULTON, J.L. [Ed] (1992) Additifs & auxiliaires de fabrication dans les industries agro-alimentaires. F 75384 Paris Cedex 08, France; Technique et Documentation Lavoisier. Ed. 2, xxxi + 799pp. ISBN 2-85206-606-8.
- RICHARD, H. [Ed] (1992) Épices et aromates. F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. 339pp. ISBN 2-85206-774-9.

- BERNARD A. & CARLIER H. (1992) Aspects nutritionnels des constituants des aliments. Influences des technologies. Lavoisier.
- BRYAN, F.L. (1994) L'analyse des risques-points critiques pour leur maîtrise. Comment apprécier les risques liés à la préparation et à la conservation des aliments. Organisation Mondiale de la Santé (OMS) Geneve. ISBN 92-4-254433-7. 78pp.
- CHAVAN J.K. & KADAM S.S. (1989) Nutritional improvement of cereals by fermentation. Critical reviews in Food Science and nutrition. Vol 28, issue 5, 349-399.
- CHEFTEL J.C., CUQ J.L. & LORIENT D. (1985) Protéines alimentaires : biochimie, propriétés fonctionnelles, valeur nutritionnelle, modifications chimiques. Techniques et Documentation, Lavoisier.
- DUPIN H., CUQ J.L., MALEWIAK M.I., LEYNAUD-ROUAUD C. & BERTHIER A.M. 1992. Alimentation et nutrition humaines. ESF Editeur.
- GERBOUIN-REROLLE, P. 1993. Transformation des aliments: technologies et valeurs nutritionnelles. L'enfant en milieu tropical N. 203 Revue du Centre International de l'Enfance. Paris.
- MULTON, J.L.[Ed] (1993) Techniques d'analyse et de contrôle dans les industries agro alimentaires. Volume I. Le contrôle de qualité. F 75384 Paris Cedex 08, France; Lavoisier Tec & Doc. xxiv + 365pp. ISBN 2-85206-597-5 Ed. 2.
- MULTON, J.L., ARTHAUD J.F. & SOROSTE A. (1994) La qualité des produits alimentaires: politique, incitations, gestion et contrôle. F 75384 Paris Cedex 08, France; Technique et Documentation Lavoisier. Ed. 2, xxx + 754pp. ISBN 2-85206-840-0 .
- ONYEKWERE O.O., NGODDY P.O., OSSAI G.E.A. & OLORUNDA A.O. 1977. Proceedings of the launching and first annual conference. Vol. 1. Nigerian Institute of Food Science and Technology.
- RICHARD, H.; MULTON, J.L.[Ed] (1993) Les arômes alimentaires. F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. 436pp. ISBN 2-85206-613-0.
- RICHTER J., BASLER A. & FRANZENH. (EDS) 1995. Small-scale food processing contributing to food security. Proceedings of an International Workshop held from 4 to 8 September 1995 in Bonn-Röttgen, Germany.

TECHNOLOGIE DES PRODUITS

Les céréales

- ANON. (1990) Production de farine de maïs à petite échelle. Dossier technique N. 7, série technologie CTA/BIT.
- ANON. (1991) L'utilisation industrielle du sorgho. Compte rendu d'un colloque sur l'état actuel et le potentiel des utilisations industrielles du sorgho au Nigeria . Kano, ICRISAT Décembre 1989.
- ANON. (1992) Carte de sécurité alimentaire du Bénin. Projet SECAL, Office national des céréales/GTZ.
- ASIEDU, J.J. (1991) La transformation des produits agricoles en zone tropicale. Approche technologique. CTA - Karthala.
- BOUDREAU, A.; MENARD, G. [Ed] (1993) Le blé. Éléments fondamentaux et transformation. Sainte Foy, Que. G1K 7P4, Canada; Les Presses de l'Université Laval. xxii + 439pp. ISBN 2-7637-7296-X.

- BRANDERHORST, E.; LAURENT, F.; TRECHE, S. (1994) La production artisanale de farines infantiles. Les éditions du Gret. 78p.
- BRICAS, N. N.; BRIDIER, B.; DEVAUTOUR, H.; MESTRES, C. (1994) La valorisation du maïs à l'échelon villageois. dans: Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest. Actes du séminaire « maïs prospère » 25-28 Janvier 1994 Cotonou Bénin CIRAD/FSA.
- BRICAS, N.; JAQUINOT, M.; MUCHNIK, J.; TREILLON, R.. (1984). L'artisanat alimentaire. ALTERSIAL-GRET-ENSIA, 59 p.
- DEVAUTOUR, H.; NAGO, C.M. (1989) Le maïs au Sud-Bénin. Innovations technologiques et alimentation. In Céréales en régions chaudes: conservation et transformation. Paris, France, AUPELF/UREF, Edit. John Libbey Eurotext, p. 167-177.
- GODON, B. [Ed] (1993) Biotransformation des produits céréaliers. F 75008 Paris, France; Techniques & Documentation Lavoisier. xi + 221pp. ISBN 2-85206-687-4 (Lavoisier) & ISBN 2-7380-0315-X (INRA).
- GODON, B.; LOISEL, W. [Ed] (1998) Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. xix + 819pp. ISBN 2-7430-0123-2.
- GUINET, R.; GODON, B. [Ed] (1994) La panification Française. F 75384 Paris Cedex 08, France; Technique et Documentation Lavoisier. xi + 528pp. ISBN 2-85206-902-4.
- HOUNHOUIGAN, D.J. (1993) Valorisation de produits vivriers tropicaux : préparation de biscuits et de farines instantanées par cuisson extrusion. Dans : Transformation et utilisation industrielle du sorgho et céréales assimilées en Afrique. Actes du symposium OUA/SAFGRAD, Ouagadougou, 22-26 Novembre 1993.
- HOUNHOUIGAN, D.J. (1994) Fermentation of maize (*Zea mays* L.) meal for mawè production in Benin: physical, chemical and microbiological aspects. Thèse PhD, Université de Wageningen, Pays-Bas.
- NAGO, C.M.. (1986) Étude des principales plantes alimentaires traditionnelles au Bénin. Communication scientifique au séminaire interafricain FAO/UI, Ibadan, Nigeria, décembre 1986.
- NAGO, C.M.. (1989) Technologies traditionnelles et alimentation au Bénin : aspects techniques, biochimiques et nutritionnels. Abomey-Calavi, Bénin, Faculté des Sciences Agronomiques, Université Nationale du Bénin, 222 p.
- NAGO, C.M.. (1992) Street Foods in West Africa. Rome, Italie, FAO.
- NAGO, C.M.; HOUNHOUIGAN, D.J. (1990) La technologie traditionnelle de transformation du maïs en pâte fermentée au Bénin. Rapport de recherche n° 1, FSA-IRAT-CEE, 30 p.
- THUILLIER, C.; HOUNHOUIGAN, D.J.; DEVAUTOUR, H.; NAGO, C.M.; MUCHNIK, J. (1991) Filières courtes et artisanat alimentaire au Bénin. Rapport de recherche. Montpellier, France, MRT-CIRAD-FSA, 100 p.

La rizerie

- ANGLADETTE, A. (1966) Le Riz. Techniques agricoles et productions tropicales. Editions Maisonneuve et Larose. 15, Rue Victor Cousin, Paris V. ISBN 2-7068-0324-X.

Les racines et tubercules

- AGBOR EGBE, T.; BRAUMAN, A.; GRIFFON, D.; TRECHE, S. (1995) Transformation Alimentaire du Manioc. CIRAD, ORSTOM,CTA. Paris. 747 p.
- ASIEDU, J. J. (1991) La transformation des produits agricoles en zone tropicale. CTA-KARTHALA ; 108 p.

NAGO, C.M.; HOUNHOUIGAN, D.J. (1998) La transformation alimentaire traditionnelle des racines et tubercules au Bénin. Les Publications du CERNA, FSA, UNB, Bénin.

Les produits oléagineux

ASIEDU J.J. (1991) La transformation des produits agricoles en zone tropicale. Approche technologique. CTA – Karthala.

REDHEAD, J. (1990) Utilisation des aliments tropicaux: graines oléagineuses tropicales. FAO, Rome. Etudes Alimentation et Nutrition 47/55 . ISBN 92-5-202800-5.

UCCIANI, E. (1996) Nouveau dictionnaire des huiles végétales. Composition en acides gras. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. viii + 644pp. ISBN 2-7430-0009-0.

Les fruits et légumes

ANON. (1984) Le point sur la transformation des fruits tropicaux. Altersial, Gret - France.

ANON. (1985) Mémoire Technique sur la transformation des fruits. CEEMAT - SIARC - USTL - France.

ANON. (1985) Mémoire Technique sur la transformation des légumes. CEEMAT - SIARC - USTL - France.

BHALLA, A.S. (Ed) (1990) Conservation des légumes à petite échelle. Technology Series, Technical Memorandum No.13, World Employment Programme, International Labour Office, Geneva, Switzerland.

BHALLA, A.S. (Ed) (1990) Conservation des fruits à petite échelle. Technology Series, Technical Memorandum No.14, World Employment Programme, International Labour Office, Geneva, Switzerland.

ESTANOVE, P. (1985) Revue des divers procédés et matériels d'extraction des jus de fruits tropicaux.. IRFA - France.

HOUNHOUIGAN, D.J. (1982) A study of the physico-chemical factors affecting the processing of West-African citrus fruits for marmalade production. Thesis - FSA/UNB - Faculty of Technology - University of Ibadan - Nigeria.

La sucrerie

MULTON, J.L. [Ed] (1994) Le sucre, les sucres, les édulcorants et les glucides de charge dans les I. A. A. F 75384 Paris Cedex, France; Tec & Doc Lavoisier. xxiv + 816pp. ISBN 2-85206-702-1.

Les boissons alcoolisées

ANON. (1993) Recueil des méthodes internationales d'analyse des vins et des moûts. Office International de la Vigne et du Vin. 75008 Paris, France; Office International de la Vigne et du Vin. 367pp.

DELANOÉ, D.; MAILLARD, C.; MAISONDIEU, D. (1990) Le vin. De l'analyse à l'élaboration. TEC & DOC - Lavoisier, Paris. 184pp. ISBN 2-85206-831-1.

MOLL, M. [Ed.] (1991) Bières et coolers. Définition, fabrication, composition. TEC & DOC - Lavoisier, Paris. 528pp. ISBN 2-85206-752-8.

NAVARRÉ, C. (1994) L'oenologie. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Lavoisier Tec & Doc. xii + 340pp. ISBN 2-85206-949-0.

La viande et le poisson

- GIRARD, J.P. [Ed.] (1990) Technologie de la viande et des produits carnés. Collection "Sciences et Techniques AgroAlimentaires". Tec & Doc - Lavoisier - INRA. 304pp. ISBN 2-85206-725-0.
- UNIFEM (1989) Transformation du poisson. Technologies du cycle alimentaire / Manuel de reference no.4. UNIFEM, 304 East 45th Street, New York, N.Y.10017, USA

Les produits laitiers

- BYLUND, G. (1996) Dairy processing handbook. Tetra Pak Processing systems AB, Lund, Suède.
- CAYOT, P.; LORIENT, D. (1998) Structures et technofonctions des protéines du lait. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. 34, Rue de St Petersburg, 75008 Paris, France; Arilait Recherches. xviii + 363pp. ISBN 2-7430-0229-8.
- ECK, A.; GILLIS, J.C. [Ed] (1998) Le fromage. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Lavoisier Tec & Doc. xxxi + 891pp. ISBN 2-7430-0150-X.
- FAO. (1995) Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine. Collection FAO, Alimentation et nutrition no.28. ISBN 92-5-203534-6, FAO, Rome.
- LUQUET, F.-M. [Ed.] (1986) Lais et produits laitiers. Vache - Brebis - Chèvre. Volume 3: Qualité - Énergie et tables de composition. Tec & Doc Lavoisier - APRIA. 460pp. ISBN 2-85206-286-0.
- LUQUET, F.-M. [Ed.] (1990) Lais et produits laitiers. Vache - Brebis - Chèvre. Volume 2: Les produits laitiers. Transformation et technologie. Tec & Doc Lavoisier - APRIA. 656pp. ISBN 2-85206-587-8.
- LUQUET, F.-M. [Ed.] (à paraître) Lais et produits laitiers. Vache - Brebis - Chèvre. Volume 1: Les laits. De la mamelle à la laiterie. Tec & Doc Lavoisier - APRIA.
- MATHIEU, J. (1998) Initiation à la physicochimie du lait. 11 Rue Lavoisier, F 75384 Paris Cedex 08, France; Tec & Doc Lavoisier. x + 220pp. ISBN 2-7430-0233-6.
- PERRIN-BOULVARD, M. [Ed.] (1989) Les laits fermentés ; actualité de la recherche. Congrès International, 14-16 Décembre 1989, Palais des Congrès, Paris, France. Editions John Libbey Eurotext. 6, rue Blanche, 92120 Montrouge, France. ISBN 0-86196-217-6.

LEXIQUE TERMINOLOGIQUE

Activité de l'eau (Water activity*) : chiffre important pour la conservation parce que les micro-organismes ont besoin d'humidité. Il y a des circonstances où il y a assez d'humidité, mais elle n'est pas disponible (par exemple quand il y a une concentration élevée en saccharides). Par exemple, les champignons ne pousseront pas dans la confiture (30% d'eau et a_w basse), mais cependant, ils pousseront sur le blé (10% d'eau mais a_w plus élevée). L'activité de l'eau exprime l'humidité disponible.

Aliments (Food): substances prises par la bouche qui maintiennent la vie et la croissance, donnent l'énergie, construisent et remplacent les tissus.

Appertisation (Appertization) : la destruction de tous les micro-organismes importants dans les aliments ; quelques micro-organismes restent vivants, mais ne se multiplient plus ("commercial sterility"), nommé ainsi en référence à Nicolas Appert.

Autoclave (Autoclave) : un fourneau dans lequel on obtient des températures élevées par l'utilisation de pressions de vapeur élevées. Les autoclaves ont deux buts : diminuer la période d'ébullition et de stérilisation. Les micro-organismes sont tués plus rapidement à ces températures élevées. Les autoclaves sont utilisées pour stériliser les aliments emballés, par exemple en boîte.

Blanchiment (Blanching) : un traitement à la chaleur. On blanchit les fruits et les légumes avant la mise en conserve, séchage ou congélation, et ce pour diverses raisons : ramollissement de la texture, dégonflement, élimination de l'air, destruction des enzymes, élimination des odeurs non désirées. Le blanchiment se réalise par trempage dans l'eau chaude (90-100°C) pendant 0,5 à 5 minutes, ou par traitement à la vapeur.

Botulisme (Botulism) : Type rare mais assez mortel d'intoxication des aliments causée par l'endotoxine botuline, produite par *Clostridium botulinum*. La toxine interfère au niveau du système nerveux central. Le contrôle de la température du corps, de la vue et de la respiration sont dérégés. Le micro-organisme est anaérobie et les spores peuvent supporter l'ébullition à 100°C pendant 3 heures. Elles nécessitent une température de 120°C et un pH inférieur à 4,5 pour être détruites. Dès lors, les aliments bouillis, surtout la viande et les légumes non acides en conserve, peuvent encore contenir ces spores. La toxine elle-même est détruite à 65°C.

Caramélisation (Caramelization) : une couleur brune qui se forme quand on traite les saccharides à chaud ou en présence de l'acide. Alors, le "caramel" est produit par brûlage du sucre et est utilisé comme colorant. Des jus de fruits sucrés brunissent par caramélisation quand ils sont stockés à des températures élevées. Il ne faut cependant pas confondre la caramélisation avec les réactions de Maillard.

Chauffage par micro-ondes (Micro-wave heating) : chauffage par utilisation de chaleur résultant de la pénétration des ondes de haute fréquence (fréquence de radio ; 5 millions de cycles/seconde). Quand on place un aliment entre les électrodes, la chaleur est excitée à l'intérieur des aliments, et ce, à cause des forces électrostatiques et des mouvements moléculaires. Dans ce procédé, on chauffe de l'intérieur de l'aliment vers l'extérieur d'une manière rapide, contrairement au chauffage normal.

Coagulation (Coagulation) : un procédé dans lequel les protides, les cristaux gras, les globules d'émulsion, etc. deviennent insolubles, et ce à cause de la chaleur, des acides et des bases fortes, des métaux et autres produits chimiques.

Coloration de Gram (Gram stain) : les bactéries peuvent être divisées en deux groupes selon leur pouvoir de retenir (Gram-positive) ou non (Gram-négative) le colorant cristal-violet après essai de décoloration avec l'alcool. Technique nommée ainsi d'après Gram (botaniste Danois).

* Terme anglais

- Compte-plaque** (Plate count) : afin de déterminer le nombre de micro-organismes dans un échantillon, on la cultive dans une boîte de Petri contenant du agar. Sur la boîte, chaque cellule de micro-organisme se multipliera jusqu'à la formation d'une colonie visible. On compte les colonies, et le nombre de colonies comptées donne le nombre de cellules dans l'échantillon original.
- Concentration par congélation** (Freeze concentration) : concentration d'un liquide par élimination de glace pure par congélation ; il reste une solution plus concentrée (préparation de concentrés de jus de fruits, etc.).
- Congélation rapide** (Quick freezing) : congélation rapide des aliments en les exposant à un courant d'air très froid. Contrairement à la congélation normale, les petits cristaux de glace formés ne détruisent pas les cellules des aliments. Dans ce procédé, on obtient une température de -5°C en deux heures au maximum, et la température finale obtenue est de -18°C .
- Conservation** (Preservation) : pendant le stockage, les aliments peuvent se détériorer sous l'action des micro-organismes et des réactions chimiques, biochimiques et physiques. La conservation a pour but d'éviter cette détérioration. Méthodes permettant une assez longue conservation : congélation, stérilisation, séchage, addition de produits chimiques. Méthodes utilisables pour des périodes limitées : pasteurisation, salage, fumage, mise en vinaigre.
- Débit** (Flux) : la vitesse d'extraction de perméate mesurée en litres par mètre carré de superficie de membrane par heure [$\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$].
- Dénaturation** (Denaturation) : un changement de structure dans les protides, réversible avant la coagulation, mais devenant irréversible dès que commence la coagulation. La solubilité est réduite. La dénaturation peut être causée par un changement de pH, la chaleur, la radiation, l'agitation. La valeur nutritive ne change pas, l'action pharmacologique est souvent perdue.
- Désodorisation** (Deodorization) : en général appliquée pour éliminer les odeurs (par exemple : farine de poisson désodorisée), mais plus spécifiquement pour la désodorisation des lipides pendant le raffinage. La vapeur surchauffée est gargarisée à travers de l'huile chaude sous vide ; presque toutes les substances aromatiques sont éliminées par distillation.
- Echangeur** de chaleur (Heat exchanger) : appareil pour chauffage ou refroidissement rapide des liquides par application d'une grande surface et d'un courant turbulent afin d'améliorer la transmission de la chaleur. Il est utilisé pour la pasteurisation, la stérilisation et le refroidissement continu.
- Emulsion** (Emulsion) : un mélange intime de 2 phases liquides non-miscibles. L'une (la phase discontinue) est dispersée (petites gouttes) dans l'autre (la phase continue) ; par exemple, l'huile dans l'eau. La stabilité d'une émulsion dépend de divers facteurs (par exemple présence d'un stabilisateur).
- Endospores** (Endospores) : une forme dormante des bactéries ; elles ont des parois épaisses, qui sont très résistantes à la chaleur et à la sécheresse. Elles peuvent produire des bactéries végétatives par germination. Ce sont seulement les genres *Bacillus* et *Clostridium* qui peuvent former des endospores.
- Enzymes** (Enzymes) : catalyseurs biologiques produits par des cellules vivantes. Ils sont responsables de presque toutes les réactions qui ont lieu dans les plantes et les animaux. Ils sont principalement composés de protides, détruits par la chaleur et les produits chimiques qui coagulent les protides.
- Étuvage** (Parboil) : bouillir partiellement. L'étuvage est surtout important pour le riz brun (par vaporisation du riz non-décortiqué). Les vitamines-B, solubles dans l'eau, diffusent du tégument dans le grain. Quand le riz est décortiqué après, il contient beaucoup plus de ces vitamines que le riz décortiqué non-étuvé.
- Évaporation "Flash"** (Flash-evaporation) : un traitement à chaud de courte durée, de façon telle qu'un petit volume (1%) est distillé contenant toutes les substances volatiles. On récolte le distillat-"flash" séparé du distillat suivant et ensuite, le distillat-"flash" est ajouté au concentrat afin d'améliorer l'arôme. Il est appliqué au jus de fruits.

Fumage (Smoking) : on fume souvent la viande et les poissons après salage afin d'améliorer la conservation et l'arôme. On produit la fumée à partir du bois. La fumée contient des aldéhydes, phénols et acides, qui ont une action conservatrice.

Glutamate de sodium (Sodium glutamate) : sel d'acide glutamique et de sodium, utilisé comme substance aromatisante dans les aliments, surtout pour fortifier le goût de la viande.

Gluten (Gluten) : fraction de protide de la farine de blé, qui a des propriétés élastiques (essentiels à la fabrication du pain).

Homogénéisation (Homogenization) : en général, les émulsions se composent d'une suspension de globules de grandeur variable. Par homogénéisation, on diminue la taille des globules jusqu'à une dimension plus petite et plus égale. Dans le lait homogénéisé, les globules de lipides plus petits absorbent mieux les protides (stabilisateur de l'émulsion) et il n'y a pas d'auto-écrémage. En conséquence, l'écémage spontané est freiné.

Hydrolyse (Hydrolyse) : décomposition d'une substance en ajoutant les groupes OH⁻ et H⁺ de l'eau aux deux moitiés. Le saccharose est hydrolysé en glucose et fructose; les protides sont hydrolysés en peptides ou en acides aminés.

Hydroréfrigération (Hydrocooling) : les légumes sont lavés dans l'eau froide et après, encore mouillés, placés sous vide. L'évaporation de l'eau refroidit les légumes pour le transport.

Indice de Réfraction (Refractive index) : une mesure de la courbure ou de la réfraction d'un rayon de lumière entrant dans un milieu plus dense ; elle est donnée par le rapport du sinus de l'angle d'entrée et le sinus de l'angle de sortie; elle est utilisée pour mesurer les concentrations de sucre, les matières solides en solution, la pureté de l'huile, etc.

Infection alimentaire (Food-borne infection) : maladie infectieuse causée par les micro-organismes pathogènes vivants que l'on a consommés. Selon leur degré de virulence la dose minimale pour causer une infection (ou inflammation) peut varier de 2-3 cellules (certains *Escherichia coli* et *Salmonella typhi*) à quelques milliers de cellules (*Bacillus cereus*, certains biotypes de *Salmonella* et *Shigella*). L'infection est causée par l'envahissement du tissu du système gastro-intestinal. Les symptômes incluent la diarrhée (parfois sanglante), la fièvre, le malaise. La période d'incubation est de l'ordre de quelques jours. La guérison peut survenir au bout d'une à deux semaines.

Intoxication alimentaire (Food poisoning) : peut être causée par :

la contamination avec des bactéries toxigènes,
des produits chimiques toxiques
des réactions allergiques contre certains protides.

Les toxines bactériennes les plus importantes sont celles produites par *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens* et *Clostridium botulinum*.

intoxication de *Bacillus cereus*: symptômes rapides, vomissement violent.

Rétablissement après quelques jours. La toxine est inactivée par ébullition.

intoxication de *Staphylococcus aureus* : symptômes rapides, gastro-entérite après 2-4 heures, vomissement. Rétablissement rapide (1-2 jours). La toxine est thermostable.

intoxication de *Clostridium perfringens* : les mêmes symptômes qu'avec *Staphylococcus aureus*.

intoxication de *Clostridium botulinum* : → Botulisme.

Inversion des phases (Phase inversion) : le lait est une émulsion de lipides dans l'eau ; le beurre est une émulsion d'eau dans le lipide. Le changement de crème en beurre est appelé inversion des phases de l'émulsion.

Lécithines (Lecithins) : substances grasses du type des phospholipides ; elles consistent en glycérol, acides, acide phosphorique et choline. Elles sont utilisées dans l'industrie alimentaire comme émulsifiants, par exemple pour la fabrica-

tion du chocolat. Elles sont obtenues industriellement à partir du soja, de l'arachide, du maïs.

Micro-organismes (Microorganisms) : organisme vivant seulement observable à l'aide d'un microscope.

Mise en conserve stérile (Aseptic canning) : les aliments sont stérilisés en avance à des températures très élevées (150-180°C) pendant quelques secondes. Les aliments sont ensuite mis en boîte stérile de façon stérile. Il y a moins de perte d'arôme, de couleur et de valeur nutritive, comparé aux méthodes conventionnelles de mises en conserve.

Pasteurisateur (Pasteurizer) : appareil destiné à pasteuriser des liquides comme le lait, les jus de fruits, etc. Au fond, ce sont des échangeurs de chaleur. On passe le produit de façon continue entre des plaques chauffées ou par des tuyaux, où on le chauffe à la température désirée pendant une période désirée. Après cela, a lieu une réfrigération rapide.

Pasteurisation (Pasteurization) : les formes végétatives de nombreuses bactéries peuvent être tuées par traitement à la chaleur moyenne (pasteurisation), tandis que pour la destruction totale de tous les micro-organismes + spores (stérilisation) on a besoin de températures plus élevées pendant de plus longues périodes ; souvent le produit est décomposé ou endommagé par ce traitement. La pasteurisation prolongera la durée de conservation pendant une période limitée.

Pathogènes (Pathogens) : micro-organismes qui causent des maladies, souvent des inflammations.

Perméat (Permeate) : le liquide passant à travers une membrane de filtration.

Phénoloxydases (Phenol oxydases) : enzymes causant le brunissement enzymatique par l'oxydation des substances phénoliques jusqu'aux quinones, qui ont une couleur brune (par exemple dans les fruits et champignons coupés).

Produits de conservation (Preservatives) : toute substance qui est capable de freiner ou arrêter le processus de détérioration par fermentation, acidification, putréfaction, etc. Parce qu'il y a des produits de conservation qui peuvent être toxiques, l'utilisation de certains produits dans les aliments est limitée à certains taux. Quelques substances permises à un taux indéfini : le sel, le salpêtre, le sucre, l'acide lactique, l'acide acétique, la glycérine, l'alcool, des condiments. Quelques produits de conservation permis à des taux limités : l'acide sorbique, l'acide benzoïque, et le dioxyde de soufre.

Rancissement lipolytique (Lypolitic rancidity) : quelques micro-organismes produisent des lipases, des enzymes qui hydrolysent les lipides. Dans les aliments, ils hydrolysent les lipides jusqu'au glycérine. Les lipases sont détruites par la chaleur.

Réactions de Maillard (Maillard reaction) : le brunissement non-enzymatique. C'est une réaction de condensation entre les acides aminés ou protides et les saccharides réducteurs. Dans les protides ce sont surtout les groupes amines libres de la lysine qui réagissent avec les saccharides. Cela cause une perte de lysine disponible, parce que le complexe "lysine-saccharide" n'est pas digestible.

Rétentat (Retentate) : le sédiment, le concentrat, ou le liquide retenu par une membrane de filtration.

Saccharides (Carbohydrates) : substances qui contiennent du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène, par exemple les sucres, l'amidon, les dextrines, le glycogène, la cellulose. On peut les hydrolyser (chimiquement ou à l'aide des enzymes) jusqu'aux sucres simples (monosaccharides) comme le glucose, le fructose, le galactose.

Salage (Pickling) :

Légumes : immergés dans une saumure de 5-10%, ils subissent une fermentation lactique. Les micro-organismes non désirés sont supprimés par le sel. A 25°C, le procédé dure quelques semaines, avec une concentration finale en acide lactique de 1% environ.

Viande : le salage améliore sa couleur, son arôme et sa conservation. La saumure contient du NaCl, du NaNO₃ et du sucre. Seuls les micro-organismes halophiles se développent et transforment le nitrate en nitrite, qui se combine aux pigments rouges des muscles (myoglobine), donnant une couleur rouge (nitrosomyoglobine).

Séchage par congélation ou lyophilisation (Freeze drying) : méthode de séchage où le matériel est congelé et se trouve sous vide. L'effet réfrigérant de l'évaporation garde le matériel congelé, tandis que la glace s'élimine par sublimation sous forme de vapeur. La méthode est surtout appliquée pour traiter des substances sensibles à la chaleur. Il n'y a pas de perte de texture et d'arôme.

Sécheur à pulvérisation (Spray dryer) : appareil dans lequel on pulvérise le produit liquide concentré à sécher dans une chambre avec de l'air chaud. Le produit sec tombe en poudre dans le fond conique. Parce que la période de chauffage est assez courte, il y a très peu de perte de valeur nutritive. Il est utilisé par exemple pour le séchage du lait.

Solution primaire (Feed) : la solution que l'on veut concentrer ou fractionner par séparation par membrane.

Soxhlet (Soxhlet) : appareil destiné à l'extraction de matière solide, surtout pour l'extraction des lipides. La matière solide se trouve dans un tube poreux et est percolée d'une façon continue par le solvant frais. Le solvant contenant les lipides est transmis (par siphonnage) dans un ballon, où le solvant est distillé et percole encore la matière solide qui reste dans le tube. A la fin, tous les lipides se trouvent dans le ballon.

Stérilisateur hydrostatique (Hydrostatic sterilizer) : stérilisateur continu, utilisé pour la production à grande échelle des aliments en boîtes (par exemple de l'ordre de 8000 boîtes par minute). Le principe est que la pression est formée par une colonne d'eau.

Stockage en atmosphère modifiée (Modified Atmosphere storage) : méthode de stockage sous gaz à l'état frais, surtout utilisée pour les fruits et les légumes. Exemple : Pommes Cox d'orange : 2,5 % d'oxygène, 5 % de CO₂, 92 % d'azote. Les oeufs peuvent être stockés 9 mois sous 60 % de CO₂, la viande réfrigérée, 60-70 jours sous 10 % de CO₂, et parfois, on ajoute quelques ppm d'ozone (O₃).

Substances émulsifiantes (Emulsifying agents) : substances comme les gommes, jaune d'oeuf, albumine, caséine, savons, agar, lécithine, monostérate de glycérine, alginates qui aident la dispersion uniforme d'huile dans l'eau. Par exemple, émulsions comme la margarine, la crème glacée, etc.

Texture (Texture) : qualité physique des aliments que l'on détermine surtout avec la bouche, ne prend pas en compte la température et le goût. La texture inclut la rudesse, la souplesse, la granulation, la masticabilité, la succulence et résulte de la densité, de la viscosité, de la tension.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient cordialement les personnes et éditeurs suivants, pour avoir autorisé la reproduction des figures et données suivantes:

- CIRAD Editions, Montpellier, France: Cruz, J.F., Troude, F., Griffon, D. & Hébert, J.P. (1998) Conservation des grains en régions chaudes. Techniques rurales en Afrique. (Figure 4.4.1).
- CRDI/IDRC, Ottawa, Canada: Bassey, M.W. & Schmidt, O.G. (1989) Les décortiqueurs à disques abrasifs en Afrique. (Figure 6.1.5).
- CTA (Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale), Wageningen, Pays Bas/Karthala, Paris, France: J.J. Asiedu (1991) La transformation des produits agricoles en zone tropicale: approche technologique. (Figures 6.1.1, 6.1.2 et 6.4.2).
- Editions du GRET/Coopération Française/CTA, Paris, France: Ribier, Daniel & Rouzière, André (1995) La transformation artisanale des plantes à huile. (Tableau 6.4.4).
- ESF Editeurs, Paris, France: H. Dupin, J.L. Cuq, M.I. Malewiak, C. Leynaud-Rouad, A.M. Berthier, Alimentation et Nutrition humaines. (1992) (Figures 4.3.2., 5.4.1 et Tableaux 2.2.1 et 5.4.1).
- FAO, Rome, Italie: Glossaire illustré des machines pour l'usinage du riz." Bulletin des services agricoles de la FAO No.37 (1979). (Figure 6.1.4).
- Institut International du froid, Paris: "Manuel de l'entreposage frigorifique dans les pays chauds en développement" (1990) (Tableau 4.3.2).
- Centre International pour l'Enfance, Château de Longchamp, 75016 Paris, France: "L'enfant en milieu tropical" No.207 (1993) (Tableaux 3.5.2 et 4.4.1).
- Leniger, H.A. & Beverloo, W.A. (1975) Food Process Engineering :. D.Reidel Publ. Co. Dordrecht, Boston. (Figures 3.2.4, 3.2.9, 3.2.10, 3.2.12, 3.4.1, 3.4.2, 3.4.5, 3.4.6, 3.4.7, 3.4.9, 3.5.3, 3.5.4, 3.5.5, 3.5.6, 3.5.7, 3.5.8, 3.6.2, 3.6.3, 3.6.5, 3.6.6, 3.6.7, 3.6.8, 3.6.9, 3.6.10, 4.2.9, 4.2.10, 4.2.11, 4.2.15, 4.4.7, 4.4.8, 4.4.9 et 4.4.10).
- Marcel Dekker Inc., New York, USA: Nawar (1996) Chapter 5 Lipids, in O.Fennema, Food Chemistry, 3rd Edn (Figure 2.3.5)..
- Springer-Verlag, New York Berlin Heidelberg: Belitz, H.-D. & Grosch, W. (1987) Food Chemistry. (Figure 1.2.1).
- Technique et Documentation - Lavoisier, Paris, France: Cheftel, J.C. & Cheftel, H. (1976-77) Introduction à la Biochimie et à la technologie des aliments, Volume 1. Chapitre III-4. Brunissement enzymatique (Figure 2.3.16).
- Tetra Pak Processing Systems AB, S-221 86 Lund, Sweden : "Dairy Processing Handbook" (1995) (Figures 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 3.2.11, 3.2.13, 3.5.9, 3.6.11, 4.2.13, 4.2.14, 4.2.16, 4.3.4, 4.4.11, 4.4.12, 4.4.14, 6.6.2, 6.6.3, 6.6.4, 6.9.2, 6.9.3, 6.9.4 et Tableau 3.5.3).
- U.S. Government Printing Office, Pittsburgh - PA, USA: Stored-grain pests. USDA Farmers' Bulletin No. 1260 (1965) (Figures 2.4.5 - 2.4.12).
- Par ailleurs, les auteurs remercient les personnes suivantes :
- Dr. Cheik Ouattara, Ouagadougou, Burkina Faso, Ir Praxède Gbaguidi-Darbox, Cotonou, Bénin et Ir Siemen Schoustra, Wageningen, Pays-Bas, pour leur assistance rédactionnelle.
- Enfin, que le Prof. P. Walstra, de l'Université Agronomique de Wageningen dont nous avons utilisé quelques idées de notes de cours « Nutrition et Aliments », trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

A

acide 166
 acétique 136
 benzoïque 135
 lactique 133, 136
 acides 133
 aminés 5
 gras 6
 gras insaturés 175
 activation, énergie d' 88
 activité enzymatique 123
 adaptation 166
 adhésivité 144
 adsorption 4
 aérobies 16
 aflatoxine 183
 agents 173
 anti-oxydants 34, 40, 135, 175
 aromatisants 167
 épaississants 154
 liants des métaux 182
 stabilisants 154
 tensio-actifs 151
 agitateurs 62
 agrandissement 53
 albumen farineux 195
 alcool 133, 136
 alcoolisées, boissons 237
 aliments 257
 fermentés 181
 altérations d'origine microbienne 28
 amère 166
 amidon 8, 154, 202
 amidons 173
 amylopectine 8
 amylose 8
 anabolisme 19
 anaérobies 16
 analyse microbiologique 189
 des aliments 187
 sensorielle 170
 antibiotiques 134
 antimicrobiennes, substances 184
 antitryptique, activité 183
 apparence 141
 Appert, Nicolas 92
 appertisation 92, 257
 apports quotidiens conseillés 176
 arachnides 43
 arôme 40, 136, 141, 165, 167
 Arrhenius 88, 93
 arthropodes 43
 aseptique canning 98, 102
 aspect 29
 atmosphère contrôlée 110, 231
 modifiée 110
 modifiée, stockage en 261
 autoclave 104, 257

B

Bacillus cereus 23
 bactéricide 51
 bactéries 15, 16
 bactériocines 136
 bactériostatique 51
 balles 206
 battage 64
 bière 237
 Bigelow 94
 Bingham, corps de 158
 bioconserves 136
 biscuits 206
 blanchiment 90, 91, 104, 131, 176, 206, 209, 228,
 257
 blé 181, 193
 blutage 176
 boissons 205
 boîte, mise en 240
 boîtes de conserve 75, 76
 botulisme 257
 bouche 165
 bouillies 205
 bout par-dessus bout 106
 brassage 238
 brasserie 205
 broyage 199, 220, 227
 dépulpage 64
 brunissement enzymatique 41
 non enzymatique 37, 86, 123, 173

C

calibrage 226
 calorimétrique, bombe 171
Campylobacter jejuni 22
 capacité, calcul de 117
 capsule métallique 80
 caramélisation 173, 257
 caséine 153
 catabolisme 19
 cavité 165
 cellulose 8, 173
 centrifugation 64, 67
 céréales 193, 195
 chaleur 172, 177, 184, 229, 240
 capacité de 59
 de congélation 117
 de refroidissement 116
 apport de 116
 échangeurs de 107
 passage de la 59
 pénétration de la 85
 production de 116
 champignons 15, 17
 changements physico-chimiques 124
 charge électrique 147
 chaud, réactions à 36
 chauffage 57

chimiques, produits, de conservation 132, 134
 cinétique 85
 cisaillement 144
 contrainte de 155
 CJA (Consommation journalière acceptable) 135
 clarification 228, 233
Clostridium botulinum 25, 26, 101
 perfringens 23
 coagulation 6, 257
 coalescence 146, 147, 165
 colorants 170
 compensation 167
 comportement élastique non-linéaire 159
 plastique 160
 thixotropique 161
 composition, tables de 9, 10
 compression 144, 157
 compte-plaqué 258
 concentration par congélation 258
 condensation 69
 conditionnement 74, 220, 239
 conductibilité 58
 conduction 57, 58
 confiance, intervalle de 186
 confitures 230
 congélation 242
 rapide 109, 258
 conservation 50, 51, 258
 à sec 119
 par la chaleur 90
 produits de 260
 convection 57
 corrosion 78, 104
 couche à aleurone 180, 195
 couleur 28, 40, 141, 168
 courant de liquide 59
 couscous 206
 couvercle 81
 cristallisation 69, 109, 165
 croissance des bactéries 18
 cuisson 173, 174, 176, 184, 203, 212, 235
 au four 174
 culture 167, 171

D

dangers 190, 191
 débit 258
 débouillage 228
 décantation 64
 décoloration 217
 décomposition 175
 décorticage 64, 196, 197, 208
 industriel 199
 découpage 227
 déformation 154, 155, 157
 dégâts économiques 46
 hygiéniques 46, 48
 matériels 48

dégérmage 197
 dégustation, jury de 170
 démulcification 217
 dénaturation 86, 174, 258
 dénoyautage 227
 déshydratation 240
 désinfection 110
 désodorisation 217, 258
 désorption 4
 dessiccation 110
 déstabilisation 146
 détérioration 21, 50, 51, 141
 mécanismes de 123
 diagramme technologique 53
 diélectrique, constante 147
 diffusion 64, 162
 diffusivité 162
 apparente 163
 digestibilité 172, 173, 174
 dilatant 159
 dissociation 133
 distillation 64, 69
 DLVO, théorie 149
 dureté 144

E

eau 3
 eau, activité de l' 3, 19, 40, 110, 122, 133, 189, 191,
 257
 eau, vapeur d' 104
 écart-type 186
 échangeur de chaleur 258
 écoulement 150, 154, 155
 écrémage 165
 écumes 145
 édulcorant, pouvoir 8
 effet utile 113
 égrenage 64
 élasticité 144
 élastique, solide 155
 emballage 53, 74,
 des produits séchés 75, 81
 matériaux d' 75
 embryon 195
 émulsifiantes, substances 261
 émulsion 145, 152, 224, 258
 endosperme 194
 endospores 258
 énergie 171
 enrichissement 211
 entreposage 110
 environnement 82
 enzymes 9, 181, 258
 épaississants 173
 épépinage 227
 épluchage 64, 226
Escherichia coli entéropathogène 23
 étalonnage 185

étuvage 210, 258
 eucaryote 15
 évaporation 233
 et concentration 69
 “Flash” 258
 exactitude 185
 exhaustion 104
 extraction 69
 extrinsèques, facteurs 143

F

fabrication, plan de 142
 facteurs antinutritionnels 172, 182, 183
 farines 202
 de sevrage 201
 infantiles 206
 Fechner, loi de 166
 fermentation 180, 183, 238
 fermentation acétique 138
 alcoolique 136, 137, 203
 du manioc 214
 hétérofermentative facultative 138
 hétérofermentative obligatoire 138
 lactique 137, 181, 240
 lactique homofermentative obligatoire 138
 fibres alimentaires 173
 Fick, loi de 162
 filtration 64, 67
 flatulence 182, 183
 flocons 153
 floculation 146, 147, 149, 150, 165
 forums de consommateurs 171
 fracture 155, 161
 frigorifiques, entrepôts 115
 magasins 118
 froid 108, 230, 239, 242
 artificiel 113
 froide, chaîne 119
 fromage 247
 fructose 8, 173
 fruits 225, 226
 fumage 242, 259
 fusion 146

G

galactose 8
 galettes 204
 gélatine 153
 gélatinisation 154
 gelées 230
 gels 153
 de particules 145
 germe 195
 glaçage 210
 glace 109
 glucides 173, 188
 glucose 8, 173

glucosides cyanogénétiques 213
 glutamate de sodium 259
 gluten 259
 glycérides 6
 goût 29, 40, 133, 136, 141, 165
 goût sucré 8
 grain 121
 grains décortiqués 200
 Gram, coloration de 16, 257
 grillage 212

H

HACCP 122, 190
 Hamaker, constante de 147
 homogénéisation 259
 HTST 98, 101, 106
 huilage 210
 huile d'arachide 222
 de coco 221
 de friture 175
 de palme et de palmiste 223
 extraction de l' 220
 huilerie 219
 humidité 177
 hybridation ADN/ARN 189
 hydrolyse 6, 175, 259
 hydrophile-lipophile 152
 hydroréfrigération 259
 hystérésis 4

I

immunoenzymologie 189
 immunofluorescence 189
 inappétence 50
 indice HLB 152
 infection alimentaire 259
 inhibiteurs de protéase 182
 insectes 43, 46, 109
 insectes, lutte contre les 47
 intervention, critères d' 191
 intestinal, transit 173
 intoxication alimentaire 259
 intoxications 21
 intrinsèques, facteurs 143
 inversion des phases 259
 irradiation 231
 isolation, matériaux d' 118
 isotherme de sorption 4, 124

L

lactose 8, 173
 lait en poudre 246
 fermenté 246
 pasteurisé conditionné 244
 stérilisé 245
 laitiers, produits 243
 laits concentrés 245

laminaire 59
 langue 166
 lavage 172, 226
 lécithines 259
 lectines 182
 légumes 225, 226
 levures 15, 17
 liaisons, doubles 175
 linamarine 213
 lipases 7
 lipides 6, 175, 188
 lipides, oxydation des 32, 172
 lipolyse 175
 liquide Newtonien 156
Listeria monocytogenes 22
 logistique 143
 lotaustraline 213
 lumière 177
 lyophile, interaction 144
 lyophilisation 130, 172, 261
 lyophobic, interaction 144
 lyoxygénases 7

M

magasin 110
 Maillard 6, 37, 86, 124, 173, 174, 188
 réactions de 260
 maïs 181, 182, 183, 193, 197, 199
 maladies 21
 infectieuses 21
 malaxage 236
 maltage 203, 237
 maltose 8
 manioc 122
 alcool de 216
 amidon de 215
 cossettes de 214
 margarine 224
 marmelades 230
 masquage 167
 mastication 157, 161
 matières grasses 7
 maturité 168, 178
 mélange 53, 172
 mélangeurs 61
 micro-filtration 68
 micro-ondes, chauffage par 257
 micro-organismes 15, 260
 destruction des 85, 92
 pathogènes 191
 mil 181, 182, 193, 196
 minéraux 9, 176, 188
 disponibilité des 183
 mise en conserve stérile 260
 moisissures 15
 monophénolase 42
 moultre 70

moulins 231
 mousse 152
 mousses 145
 mouture 199
 mouvement Brownien 150, 162
 Munsell, système 169
 mutagènes, corps 175
Mycobacterium tuberculosis 22
 mycotoxines 27

N

nano-filtration 68
 nasale 165
 naturelle 183
 nerf optique 168
 nettoyage 226
 neutralisation 217
 niébé 182
 nuisance 50
 numéro "E" 135
 nutriments, pertes de 172
 nutritionnelle 172, 174

O

odeur 28, 40, 167
 œufs 46
 opérations culinaires domestiques 172
 unitaires 53, 172, 179
 optimisation des traitements thermiques 99
 ordre de la réaction 86
 organoleptiques, propriétés 141
 osmose inverse 68
 oxydation 172, 175, 177, 188
 enzymatique 35
 oxygène 177

P

paddy 206, 207
 pain 204, 205
 papilles gustatives 165
 parage 176, 226
 parasites 109
 Pasteur 92
 pasteurisateur 260
 pasteurisation 51, 90, 91, 172, 191, 260
 pâtes 145, 204
 alimentaires 205
 fermentées 202
 pathogènes 260
 PCR 189
 pectine 153
 pelage 226
 percepteurs visuels 168
 perception trichromatique 169
 perceptions sensorielles 165
 péricarpe 194
 perméat 260

perte de goût 165
 pesage 226
 pH 20, 40, 98, 133, 136, 177, 180, 184
 pH extracellulaire 134
 intracellulaire 134
 phénoloxydases 260
 phospholipide 7
 phytates 183
 phytohémagglutinines 174
 planschister 209
 plasticité 144
 plastiques, corps 158
 point critique pour la maîtrise 191
 points critiques 190
 pois chiche 182
 poisson 240
 polissage 210
 polypeptides 5
 polyphénoloxydase 42
 polyphénols 183
 polysaccharidases 37
 pompes 56
 précision 185
 précuisson 228
 pressage 64, 67, 227
 procaryote 15
 production, chaîne de 142
 propriétés colloïdales 144
 protéinases 36
 protéines 36, 174, 187
 antinu nutritionnelles 174
 valeur biologique des 172
 protides 5, 174
 protozoaires 15
 pseudoplastique 159

Q

Q 10, 90
 qualité 141, 172
 hygiénique 172
 maîtrise de la 185
 nutritionnelle 171
 organoleptique 165
 physique 144

R

racines 211
 radiation 57
 ionisante 138
 radioactifs, résidus 139
 raffinage 217
 rancissement 175
 lipolytique 260
 râpage 64, 227
 rayon d'électrons accélérés 139
 récepteurs 166
 gustatifs 166
 olfactifs 167

reconstitution 124
 réduction de taille 53, 70, 179
 décimale 95
 décimale, temps de 93
 réfraction, indice de 259
 réfrigérante, machine 113
 à absorption 115
 à compresseurs 113
 réfrigérants, liquides 114
 réfrigération 109, 111
 refroidissement 57
 répulsion électrostatique 147, 153
 stérique 148, 153
 réseau 153
 résistance 144, 155
 rétentat 260
 rétine 168
 rétrogradation 154, 165
 rhéologie 144
 rhéologiques, propriétés 189
 rigidité, module de 155
 risque 190, 191
 riz 179, 181, 193
 blanchi 180
 cargo 179, 206
 décortiqué 206
 rizerie 206
 rongeurs 48
 rouleau 129
 rupture 155, 161

S

saccharides 7, 260
 saccharine 8
 saccharose 8, 173
 salage 240, 242, 260
 salée 166
 salmonelles 24
 salubrité 122, 141, 142
 saveur 40, 165
 savon 223
 science alimentaire 1, 2
 séchage 69, 119, 121, 130, 213, 230, 241
 aspects théoriques du 124
 par congélation 261
 par sublimation 131
 solaire 120
 vitesse de 126
 sécher, étuve à 127
 sécheur à pulvérisation 261
 séchoir à atomisation 126, 128
 à cylindre 129
 à cylindre rotatoire 128
 à ruban 127
 à tunnel 127
 pneumatique 128
 sédimentation 64, 65, 165

sel 133, 136, 229
 semoules 200, 202
 séparation 53, 63
 des phases 146
 par membrane 68
 sertissage 78
 seuil de perception 166
Shigella 22
 sirop de glucose 216
 sirops de fruits 230
 SO₂ 135
 solubilité 6
 solution primaire 261
 solutions 145
 son 206
 sorgho 182, 193, 196
 soxhlet 261
 spore bactérienne 17
 spores 20
 stabilité 141, 142, 145
Staphylococcus aureus 26
 statistique 185
 statistiques, méthodes 185
 stérile, mise en conserve 102
 stérilisateur hydrostatique 261
 stérilisation 51, 90, 91, 174
 hydrostatique 106
 stérilité commerciale 101
 stimulus 168
 stockage 121, 161
 structure 29, 155
 sublimation 130
 sucre 133, 229, 230
 sucrée 166
 sucrerie 231
 sucres réducteurs 39
 surveillance 191
 suspensions 145
 synérèse 153, 165

T

table densimétrique 209
 tamisage 64, 65, 227
 tannins 182, 183
 tapioca 215
 TDT, courbe 94
 technologie industrielle 200
 intermédiaire 200
 traditionnelle 200
 tégument 194
 température 20, 40, 163, 177, 180
 de surface humide 125
 de surface sèche 125
 texture 29, 144, 189, 261
 thaumatine 8
 thermophile 20
 thermorésistance 20, 96, 97

touraille 126
 tourbillonnant 59
 toxi-infections 21
 traction 157
 transfert de chaleur 53, 57, 102, 104
 de matière 54
 de matières 53
 transport 54, 161
 triage 172, 226
 triglycérides 6
 tubercules 211
 turbulent 59

U

UHT 100
 ultra-filtration 68

V

valeur 174
 alimentaire 172
 calorique 188
 nutritionnelle 29, 40, 141, 142, 175, 179
 nutritive 139, 181
 stérilisatrice 95, 100
 van der Waals, attraction 153
 force de 147
 variabilité 185
 vérification 192
 verre 79
 récipients en 79
 viande 239
Vibrio parahaemolyticus 24, 25
 vinaigre 133, 229
 virus 15, 26
 viscoélastiques 158
 viscosité 144, 145, 157, 163
 de traction 158
 visibilité, courbe de la 169
 visqueux, fluide 155
 vitamines 9, 172, 176, 182, 188
 stabilité des 177
 vitesse de la réaction 86
 constante de 88
 vitreuse 145
 votator 107

Y

yaourt 246
Yersinia enterocolitica 25
 Young, module de 157