

# Table des matières

## Introduction

De l'empirisme à la technologie raisonnée . . . . .	2
De la conception de l'aliment à la technologie d'assemblage . . . . .	3
De la nécessité de l'emballage et du conditionnement . . . . .	4

## Première partie

### Biochimie et technologie des produits d'origine animale

#### Chapitre 1

#### Du lait aux produits laitiers

1. Biochimie et physico-chimie du lait . . . . .	7
1.1. Matière grasse laitière . . . . .	8
1.1.1. Composition et caractéristiques de la matière grasse laitière . . . . .	8
1.1.2. Membrane des globules gras . . . . .	10
1.2. Glucides . . . . .	11
1.3. Protéines . . . . .	12
1.3.1. Caséines . . . . .	12
1.3.2. Structure de la micelle de caséine . . . . .	14
1.3.3. Protéines sériques . . . . .	15
1.4. Minéraux du lait . . . . .	17
2. Bases biologiques et physico-chimiques de la transformation du lait . . . . .	19
2.1. Facteurs de stabilité des globules gras . . . . .	19
2.1.1. Globules gras natifs . . . . .	19
2.1.2. Globules gras homogénéisés . . . . .	20
2.2. Facteurs de stabilité des protéines . . . . .	21
2.2.1. Influence de la température . . . . .	22
2.2.2. Influence d'une concentration du lait . . . . .	23
2.2.3. Influence d'une modification de l'environnement ionique . . . . .	23
2.2.4. Influence d'une acidification . . . . .	23
2.2.5. Influence d'un ajout de présure . . . . .	24

3. Technologie des produits laitiers . . . . .	26
3.1. Lait de consommation . . . . .	26
3.1.1. Lait cru . . . . .	27
3.1.2. Lait traité thermiquement . . . . .	27
3.1.3. Lait microfiltrés . . . . .	29
3.2. Produits laitiers fermentés . . . . .	30
3.2.1. Standardisation du lait de fabrication . . . . .	31
3.2.2. Homogénéisation . . . . .	31
3.2.3. Traitement thermique . . . . .	31
3.2.4. Fermentation . . . . .	31
3.3. Lait en poudre . . . . .	33
3.3.1. Séchage du lait . . . . .	33
3.3.2. Propriétés physiques des poudres de lait . . . . .	35
3.3.3. Propriétés technologiques des poudres de lait . . . . .	37
3.4. Fromages . . . . .	40
3.4.1. Standardisation physico-chimique et biologique des laits . . . . .	41
3.4.2. Coagulation . . . . .	43
3.4.3. Égouttage . . . . .	44
3.4.4. Affinage . . . . .	50
3.4.5. Accidents de fromagerie et défauts des fromages . . . . .	54
3.5. Crèmes et beurres . . . . .	55
3.5.1. Crèmes . . . . .	56
3.5.2. Beurres . . . . .	57
3.5.3. Beurre NIZO . . . . .	60

## *Chapitre 2*

### **Du muscle à la viande et aux produits dérivés**

1. Biochimie du muscle (animaux terrestres et poissons) . . . . .	61
1.1. Organisation et composition du muscle de viande et de poisson . . . . .	62
1.1.1. Organisation des tissus . . . . .	62
1.1.2. Comparaison des compositions biochimiques du muscle de la viande et du poisson . . . . .	65
1.2. Structure du muscle . . . . .	68
1.2.1. Cellule musculaire . . . . .	68
1.2.2. Muscles blancs et muscles rouges . . . . .	72
1.2.3. Tissu conjonctif . . . . .	72
1.3. Protéines . . . . .	72
1.3.1. Protéines du tissu musculaire . . . . .	72
1.3.2. Protéines du tissu conjonctif . . . . .	77
1.3.3. Autres protéines du tissu conjonctif . . . . .	81
1.4. Glucides . . . . .	81
1.5. Vitamines et minéraux . . . . .	81
2. Bases biologiques et physico-chimiques de la transformation du muscle . . . . .	82
2.1. Contraction musculaire . . . . .	82
2.1.1. Couplage de l'excitation et de la contraction . . . . .	82
2.1.2. Relaxation . . . . .	82
2.1.3. Sources d'énergie de la contraction musculaire . . . . .	83

2.2. Évolution du muscle après la mort . . . . .	84
2.2.1. Transport des animaux . . . . .	84
2.2.2. L'étourdissement et la mort . . . . .	84
2.2.3. État pantelant ou phase d'excitabilité musculaire . . . . .	85
2.2.4. La <i>rigor mortis</i> ou phase de rigidité cadavérique . . . . .	86
2.2.5. Résolution de la <i>rigor mortis</i> : la maturation . . . . .	90
2.2.6. Phase d'autolyse ou de putréfaction . . . . .	93
3. Technologie de la viande et du poisson . . . . .	93
3.1. Technologie de la viande . . . . .	93
3.1.1. Fabrication du jambon . . . . .	93
3.1.2. Fabrication du saucisson sec . . . . .	96
3.2. Technologie du poisson . . . . .	99
3.2.1. Fabrication des marinades . . . . .	99
3.2.2. Fabrication du surimi . . . . .	101

### Chapitre 3

#### De l'œuf aux ovoproduits

1. L'œuf de poule, matière première de l'industrie des ovoproduits . . . . .	107
1.1. Structure et composition . . . . .	107
1.2. Caractéristiques biochimiques et physico-chimiques des fractions protéiques et lipidiques de l'œuf . . . . .	109
1.2.1. Protéines du blanc d'œuf . . . . .	109
1.2.2. Constituants protéiques du jaune d'œuf . . . . .	111
1.2.3. Lipides du jaune d'œuf . . . . .	113
2. Propriétés physico-chimiques des diverses fractions de l'œuf . . . . .	113
2.1. Propriétés interfaciales . . . . .	113
2.1.1. Propriétés moussantes du blanc d'œuf . . . . .	113
2.1.2. Propriétés émulsifiantes du jaune d'œuf . . . . .	115
2.2. Propriétés gélifiantes . . . . .	118
2.2.1. Blanc d'œuf . . . . .	118
2.2.2. Jaune d'œuf . . . . .	121
3. Industrie des ovoproduits : technologies et produits . . . . .	123
3.1. Décontamination des coquilles . . . . .	125
3.2. Cassage et séparation du blanc et du jaune . . . . .	125
3.3. Décontamination et stabilisation des ovoproduits de première transformation . . . . .	126
3.3.1. Traitements thermiques . . . . .	126
3.3.2. Radiations ionisantes . . . . .	128
3.3.3. Diminution de l' $a_w$ . . . . .	128
3.4. Ovoproduits élaborés (seconde transformation) . . . . .	129
3.5. Produits d'extraction de l'œuf . . . . .	130

**Du blé au pain et aux pâtes alimentaires**

1. Biochimie et physico-chimie du blé	139
1.1. Composition globale	139
1.1.1. Caractéristiques histologiques du grain de blé	140
1.1.2. Structure de l'albumen amylicé (amande)	142
1.1.3. Structure des enveloppes	142
1.1.4. Structure du germe	143
1.2. Structure et propriétés des constituants	144
1.2.1. Glucides	144
1.2.2. Protéines	148
1.2.3. Lipides	150
2. Bases biologiques et physico-chimiques de la transformation du blé	151
2.1. Élaboration de la texture	153
2.1.1. Structuration des pâtes boulangères	153
2.1.2. Structuration des pâtes alimentaires	155
2.1.3. Formage des pâtes	156
2.1.4. Expansion	157
2.1.5. Stabilisation	157
2.2. Élaboration de la couleur et de la flaveur	158
2.2.1. Réactions d'oxydation	158
2.2.2. Fermentations	159
2.2.3. Réactions de Maillard et de caramélisation	159
3. Technologie de la mouture, de la panification et de la pastification du blé	160
3.1. Transformation du grain en farines et semoules	160
3.1.1. Transformation du blé tendre en farine	160
3.1.2. Transformation du blé dur en semoules	166
3.2. Panification	168
3.2.1. Valeur boulangère	168
3.2.2. Critères qualité de la valeur boulangère des blés tendres	169
3.2.3. Conduites de panification	172
3.3. Pastification	181
3.3.1. Valeur pastière	182
3.3.2. Conduites de pastification	185

**De l'orge à la bière**

1. Biochimie et structure de l'orge et du malt	191
1.1. Morphologie du grain d'orge	192
1.2. Composition biochimique de l'orge	192
1.3. Composition et structure des amidons et protéines	194
1.3.1. Amidon	194

1.3.2. Protéines	194
1.4. Effet du maltage	195
1.4.1. Objectifs du maltage	195
1.4.2. Trempe	196
1.4.3. Germination	196
1.4.4. Touraillage	197
2. Bases biologiques et physico-chimiques de la transformation	198
2.1. Dégradation enzymatique des amidons et protéines	199
2.1.1. Dégradation enzymatique au cours du maltage	199
2.1.2. Dégradation enzymatique au cours du brassage	201
2.2. Fermentescibilité du moût	204
2.2.1. Objectifs de la fermentation	205
2.2.2. Modifications biochimiques	205
3. Technologie des bières	205
3.1. Étapes du maltage	205
3.1.1. Trempe	206
3.1.2. Germination	207
3.1.3. Touraillage	207
3.1.4. Dégermage et stockage du malt	208
3.2. Étapes de la fabrication de la bière	208
3.2.1. Concassage	208
3.2.2. Macération	208
3.2.3. Filtration de la maïsche	210
3.2.4. Ébullition du moût	210
3.2.5. Clarification et refroidissement du moût	211
3.2.6. Fermentation	211
3.2.7. Garde	211
3.2.8. Filtration	212
3.2.9. Stabilisation	213
3.2.10 Conditionnement	213

## *Chapitre 6*

### **Des fruits aux jus de fruits et produits fermentés**

1. Développement des fruits	215
1.1. Phases du développement	215
1.2. Maturation des fruits	216
1.2.1. Rôle de l'éthylène	217
1.2.2. Modification pariétale	218
1.2.3. Synthèse des composés aromatiques	219
2. Biochimie des jus de fruits	220
2.1. Pectines	220
2.1.1. Régions homogalacturonanes (HG)	221
2.1.2. Régions rhamnogalacturonanes (RG)	222
2.1.3. Quelques propriétés des pectines	222
2.2. Enzymes pectinolytiques	224
2.2.1. Pectine méthylestérases	224

2.2.2. Polygalacturonases .....	225
2.2.3. Lyases .....	226
2.2.4. Arabinanases .....	227
2.3. Composés amers et astringents .....	227
2.3.1. Limonoïdes .....	228
2.3.2. Flavanones .....	229
2.3.3. Proanthocyanidols .....	230
3. Technologie des jus de fruits .....	230
3.1. Préparation des fruits .....	230
3.2. Prétraitement .....	231
3.3. Pressage .....	231
3.3.1. Pressoirs discontinus .....	231
3.3.2. Presses à bande .....	232
3.3.3. Aides au pressage .....	232
3.3.4. Extracteurs pour agrumes .....	232
3.4. Traitement des jus de fruit .....	233
3.4.1. Stabilisation des jus troubles .....	233
3.4.2. Clarification des jus .....	236
3.4.3. Traitements de désamérisation .....	238
3.5. Pasteurisation, pascalisation et concentration .....	240
3.5.1. Pasteurisation .....	240
3.5.2. Traitements hautes pressions .....	241
3.5.3. Concentration .....	241
4. Cidre .....	242
4.1. Particularités du cidre français .....	242
4.2. Procédés préfermentaires .....	243
4.2.1. Extraction des moûts .....	243
4.2.2. Clarification préfermentaire .....	244
4.3. Action des micro-organismes .....	244
4.3.1. Successions de levures et fermentation .....	244
4.3.2. Altérations levuriennes et bactériennes .....	246
4.4. Interventions technologiques fermentaires et post-fermentaires .....	248
4.4.1. Conduite des fermentations .....	248
4.4.2. Opérations de conditionnement .....	249

## *Chapitre 7*

### **Des légumes aux produits « 4<sup>e</sup> gamme »**

1. L'activité respiratoire des végétaux .....	252
1.1. Mesure et modélisation de l'activité respiratoire .....	252
1.2. Maîtrise de l'activité respiratoire .....	254
2. Brunissement enzymatique .....	255
2.1. Mécanisme et évaluation .....	255
2.2. Prévention du brunissement enzymatique .....	256
3. Les opérations unitaires de fabrication des produits « 4 <sup>e</sup> gamme » : Principaux problèmes scientifiques et techniques .....	257
3.1. Les matières premières : sélection des variétés et des modes de culture .....	259

3.2. Contrôle de la qualité de la matière première : l'agrégage	260
3.3. Parage et mélange	260
3.4. Découpe	261
3.5. Lavage et désinfection	262
3.5.1. Description des procédés traditionnels de lavage et désinfection	263
3.5.2. Procédés alternatifs au chlore	263
3.5.3. La lutte contre le développement microbien	265
3.6. Essorage et séchage	265
3.7. Pesage	266
3.8. Ensachage	266
4. Emballage sous atmosphère modifiée	267
4.1. Diffusion des gaz à travers les films d'emballage	267
4.1.1. Mesure et modélisation de la diffusion des gaz à travers les films	267
4.1.2. Les différents types de films d'emballage utilisés	268
4.2. Évolution des teneurs gazeuses dans les emballages sous atmosphère modifiée	269

### *Troisième partie*

## **Propriétés et technologies des ingrédients**

### *Chapitre 8*

## **Propriétés fonctionnelles des ingrédients**

1. Interactions avec l'eau : propriétés d'hydratation et pouvoir épaississant	279
1.1. Nature des interactions	279
1.2. Influence des constituants hydrophiles sur la disponibilité et mobilité de l'eau	280
1.3. Influence de l'hydratation sur la solubilisation, la structure et la mobilité des macromolécules	281
1.4. Influence de l'hydratation des constituants sur les propriétés rhéologiques du milieu	281
2. Interactions intermoléculaires : propriétés texturantes	282
2.1. Agrégation/gélification par déstabilisation des macromolécules ou éléments particulaires	282
2.2. Agrégation/gélification par réticulation covalente	283
2.3. Transformation sol-gel	283
2.4. Influence des cinétiques de dénaturation et d'interactions moléculaires	284
3. Propriétés interfaciales : pouvoir moussant-pouvoir émulsifiant	285
3.1. Tension interfaciale	285
3.2. Nature des substances tensioactives	287
3.3. Pouvoir émulsifiant et moussant	287
3.3.1. Pouvoir émulsifiant	287
3.3.2. Pouvoir moussant	288

**Bases physico-chimiques du fractionnement et technologies associées**

1. Séparation particulaire .....	291
1.1. Agrégation, insolubilisation, cristallisation d'éléments moléculaires .....	292
1.1.1. Agrégation isoélectrique, ionique, thermochimique .....	292
1.1.2. Insolubilisation par abaissement de la constante diélectrique du solvant .....	294
1.1.3. Cristallisation .....	294
1.2. Procédés de séparation .....	295
1.2.1. Décantation et centrifugation .....	295
1.2.2. Microfiltration .....	296
2. Séparation moléculaire de nature stérique .....	298
2.1. Réduction ou accroissement de la taille des molécules à séparer .....	298
2.2. Procédés de séparation .....	298
2.2.1. Ultrafiltration .....	298
2.2.2. Chromatographie d'exclusion .....	305
3. Séparation moléculaire de nature ionique .....	306
3.1. Influence des caractéristiques physico-chimiques du solvant sur la charge .....	306
3.2. Procédés de séparation .....	307
3.2.1. Électrodialyse .....	307
3.2.2. Chromatographie d'échange d'ions .....	308
4. Séparation moléculaire par affinité .....	311
4.1. Immobilisation des ligands .....	311
4.2. Procédé d'extraction .....	312
5. Extraction de molécules lipophiles .....	313
5.1. Partition moléculaire entre deux phases non miscibles .....	313
6. Séparation après bioconversion des molécules à éliminer .....	315

**Bioconversion et transformations physico-chimiques**

1. Transformations biologiques .....	317
1.1. Agents biologiques .....	317
1.2. Cinétiques de bioconversion .....	318
1.2.1. Cinétique microbienne .....	318
1.2.2. Cinétique enzymatique .....	323
1.2.3. Cinétiques en milieu hétérogène .....	326
1.3. Bioréacteurs .....	329
1.3.1. Réacteur discontinu (batch) .....	330
1.3.2. Réacteur discontinu alimenté ( <i>Fed batch</i> ) .....	331
1.3.3. Réacteur continu parfaitement agité (CSTR : <i>continued stirred tank reactor</i> ) .....	333
1.3.4. Réacteur continu à lit fixe ou à écoulement piston (PFR : <i>plug flow reactor</i> ) .....	336
1.3.5. Réacteur PFR avec recyclage .....	337
1.4. Critères de choix d'un bioréacteur .....	338
1.4.1. Taux de conversion .....	338

1.4.2. Inhibitions	339
1.4.3. Modifications physico-chimiques du milieu réactionnel	339
1.5. Assemblage de bioréacteurs	339
2. Transformations physico-chimiques	341
2.1. Traitements hydrothermiques et mécaniques	342
2.2. Réticulation des macromolécules	345
2.3. Greffage de groupements fonctionnels	346
2.4. Hydrogénation	347

## *Chapitre 11*

### **Mise en œuvre des techniques séparatives**

1. Protéines et peptides	349
1.1. Protéines et peptides issus du lait	349
1.1.1. Concentrés de protéines totales	350
1.1.2. Caséines totales (caséines/caséinates)	352
1.1.3. Protéines solubles totales	355
1.1.4. Protéines individuelles	356
1.1.5. Peptides bioactifs	358
1.2. Extraction du lysozyme à partir du blanc d'œuf	359
1.3. Extraction de la gélatine	360
1.4. Protéines végétales	361
2. Glucides	363
2.1. Saccharose	363
2.1.1. Obtention des jus bruts	364
2.1.2. Épuration des jus	367
2.1.3. Concentration des jus par évaporation	368
2.1.4. Cristallisation du saccharose	368
2.1.5. Raffinage	371
2.1.6. Séchage	371
2.1.7. Conditionnement	372
2.1.8. Applications du saccharose et de ses dérivés en alimentaire	372
2.2. Lactose	375
2.2.1. Extraction et purification	375
2.2.2. Dérivés du lactose	377
2.3. Polysaccharides	378
2.3.1. Amidon	378
2.3.2. Carraghénanes	381
2.3.3. Alginate	383
2.3.4. Pectines	384
2.3.5. Xanthane	384
3. Lipides	386
3.1. Technologie de préparation des huiles végétales	387
3.1.1. Obtention de l'huile brute	387
3.1.2. Raffinage de l'huile brute	388
3.2. Traitements de modification des lipides	391
3.2.1. Hydrogénation	391

3.2.2. Trans-estérification . . . . .	393
3.2.3. Fractionnement . . . . .	395
4. Pigments et arômes . . . . .	396
4.1. Nature des pigments et arômes . . . . .	397
4.2. Extraction/concentration des colorants et arômes . . . . .	403
4.2.1. Extraction solide/liquide . . . . .	403
4.2.2. Extraction liquide/liquide . . . . .	405
4.2.3. Extraction par distillation . . . . .	405
4.2.4. Extraction par expression . . . . .	406
4.3. Formulation . . . . .	406

## *Quatrième partie*

### **Emballage et conditionnement**

#### *Chapitre 12*

#### **Emballage**

1. Définition et principes fondamentaux . . . . .	413
2. Fonctions de l’emballage . . . . .	414
2.1. Fonctions techniques de l’emballage . . . . .	414
2.1.1. Contenant . . . . .	414
2.1.2. Logistique . . . . .	414
2.1.3. Protection . . . . .	415
2.1.4. Service . . . . .	416
2.2. Fonctions communication de l’emballage . . . . .	417
2.2.1. Marketing . . . . .	417
2.2.2. Information . . . . .	418
2.2.3. Communication . . . . .	418
2.3. Fonction environnementale de l’emballage . . . . .	418
3. Les propriétés de l’emballage . . . . .	419
3.1. Perméabilité . . . . .	420
3.1.1. Principes physiques . . . . .	420
3.1.2. Paramètres influents sur la perméabilité . . . . .	421
3.1.3. Notion de perméabilité sélective . . . . .	423
3.2. Migrations . . . . .	423
3.2.1. Migrants potentiels . . . . .	423
3.2.2. Types de migration . . . . .	424
3.2.3. Tests de migration et réglementation . . . . .	426
3.3. Autres propriétés des emballages . . . . .	428
3.3.1. Résistance mécanique . . . . .	428
3.3.2. Conductibilité thermique . . . . .	428
3.3.3. Propriétés barrières au rayonnement . . . . .	429
4. Matériaux d’emballage . . . . .	429
4.1. Matériaux cellulosiques . . . . .	429
4.1.1. Bois . . . . .	430
4.1.2. Papiers et cartons . . . . .	430

4.1.3. Cellulose moulée	432
4.2. Verre	432
4.3. Métaux	433
4.3.1. Acier	433
4.3.2. Aluminium	434
4.3.3. Les vernis de protection de l'emballage métallique	434
4.4. Plastiques	436
4.4.1. Composition	436
4.4.2. Mise en œuvre	439
4.5. Biomatériaux	440
4.5.1. Utilisation de biopolymères pour la fabrication d'emballages	440
4.5.2. Propriétés et applications des bio-emballages	440

## Chapitre 13

### Conditionnement

1. Conditionnement sous vide	443
2. Conditionnement sous atmosphère modifiée	445
2.1. Rôle des gaz	445
2.1.1. Azote	445
2.1.2. Dioxyde de carbone	445
2.1.3. Oxygène	446
2.1.4. Autres gaz	446
2.2. Applications	447
2.2.1. Produits secs ( $a_w < 0,4-0,5$ )	447
2.2.2. Produits à humidité intermédiaire ( $0,4 < a_w < 0,8$ )	447
2.2.3. Produits à forte humidité ( $a_w > 0,8$ )	447
2.3. Réglementation	449