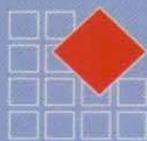


Martine Le Meste • Denis Lorient  
Denise Simatos  
*coordonnateurs*



# L'eau dans les aliments



COLLECTION  
SCIENCES & TECHNIQUES  
AGROALIMENTAIRES

Editions  
**TEC**  
& **DOC**

# Table des matières

## Première partie

### Structure et propriétés de l'eau

#### Chapitre 1

<b>De la structure de l'eau et de ses différents états physiques (Paul Caro)</b>	<b>3</b>
Introduction	3
1. L'eau dans sa vapeur	4
1.1. Structure de la molécule	4
1.2. Structure électrique	5
1.3. Structure électronique	5
1.4. Polymères de l'eau	6
2. Variantes isotopiques de la molécule d'eau	6
3. Eau liquide	7
3.1. Mécanique de l'eau	7
3.2. Surface de l'eau	8
3.3. Thermodynamique de l'eau	9
3.4. Structure de l'eau liquide	9
3.5. Simulation	10
4. Glace	11
4.1. Structure de la glace	11
4.2. Eau surfondue	11
4.3. Glace amorphe	12
4.4. Fluide critique	13
5. Ions de l'eau	13
6. Hydrophilie et hydrophobie	14
7. L'eau, molécule mobile	15
8. L'eau dans l'Univers	17
8.1. Exploration de l'Univers par les spectroscopies	17
8.2. L'eau, une molécule abondante dans l'espace	17

8.3. L'eau à la surface des étoiles .....	18
8.4. L'eau et la formation du système solaire .....	19
5. Origine de l'eau terrestre .....	19

### Chapitre 2

#### **Interactions entre l'eau et les autres constituants alimentaires – Rôle dans la conformation, l'état d'association, la stabilité et la fonctionnalité des molécules (Martine Le Meste, Eleni Chiotelli) \_\_\_\_\_**

Introduction .....	21
1. Interactions moléculaires – Conséquences sur la stabilité des molécules et des systèmes dispersés .....	22
1.1. Généralités .....	22
1.2. Structure et propriétés de l'eau pure .....	23
1.3. Interactions entre l'eau et des molécules polaires non chargées .....	25
1.4. Hydratation des ions .....	26
1.5. Hydratation et interactions hydrophobes : incidence sur la stabilité des émulsions et des mousses .....	27
2. Interactions entre surfaces – Conséquences sur la stabilité des systèmes dispersés .....	29
3. Rôle de l'hydratation dans la conformation des macromolécules .....	30
3.1. Protéines .....	30
3.1.1. État cristallisé .....	30
3.1.2. En solution .....	31
3.1.3. Produits peu hydratés .....	32
3.1.4. Interfaces .....	33
3.2. Polysaccharides .....	34
3.2.1. Structure, gélification et rétrogradation de l'amidon .....	34
3.2.2. Pectines et rétention d'eau .....	39
4. Effet « Hofmeister » .....	39
4.1. Sur la structure des macromolécules .....	40
4.2. Sur l'état d'association des solutés apolaires .....	42
4.2.1. Organisation des phospholipides .....	42
4.2.2. État d'association de la chlorophylle .....	43
5. Conclusion .....	43
Références bibliographiques .....	45

### Chapitre 3

#### **Propriétés de l'eau dans les produits alimentaires : activité de l'eau, diagrammes de phases et d'états (Denise Simatos) \_\_\_\_\_**

Introduction .....	49
1. Activité de l'eau .....	50
1.1. Définition .....	50
1.1.1. Solutions .....	50
1.1.2. Systèmes structurés .....	50
1.2. Grandeurs physiques équivalentes .....	51
1.2.1. Pression de vapeur .....	51
1.2.2. Pression osmotique .....	52
1.2.3. Abaissement cryoscopique .....	52

1.3. Relations entre teneur en eau et $A_w$ : isothermes de sorption	52
1.3.1. $A_w$ apparente	54
1.3.2. Effet de la température	54
1.3.3. Hystérésis	55
1.3.4. Influence de la composition et de la structure du produit	56
1.4. Modèles représentatifs et prédictifs	58
1.4.1. Isothermes de sorption aux $A_w$ apparentes basses et moyennes	58
1.4.2. Solutions liquides binaires	60
1.4.3. Systèmes multicomposants et mélanges	62
1.5. Chaleurs de sorption/désorption	63
2. Diagrammes de phases et d'états	63
2.1. Courbes de congélation et de solubilité	63
2.2. Transition vitreuse	65
2.2.1. Définition	65
2.2.2. Évolution du comportement mécanique	68
2.2.3. Modèles descriptifs	71
2.2.4. Fragilité	73
2.2.5. Influence de la composition et de la teneur en eau sur $T_g$	75
3. Conclusion	77
3.1. Texture des produits congelés, produits à décongélation rapide	78
3.2. Stabilité à l'état congelé	79
3.3. Séchage et stabilité de la poudre de lait	79
Références bibliographiques	79

### Chapitre 4

<b>L'eau dans la cellule vivante – État physique, fonctions (Pascale Mentré)</b>	<b>85</b>
Introduction	85
1. Révision de la représentation classique de la cellule	86
1.1. Surface de contact des macromolécules avec l'eau dans la cellule	86
1.2. Eau interfaciale	86
1.2.1. Notion d'interface	86
1.2.2. Polymorphisme de l'eau interfaciale dans la cellule	86
2. Problème du transport des molécules et du rendement chimique dans la cellule	
en quasi-absence d'eau bulk	88
2.1. Problème du déplacement des ions et des molécules dans la cellule	88
2.2. Problème du rendement des réactions chimiques dans la cellule	89
2.3. Performance du transport intracellulaire	91
2.3.1. Transport de macromolécules et d'organites	91
2.3.2. Transport apparent d'ions	92
2.4. Performance du rendement chimique dans la cellule : compartimentation métabolique et channeling	92
3. Exploitation des propriétés de l'eau interfaciale par la cellule	94
3.1. Rôle de l'eau dans l'assemblage des complexes macromoléculaires	95
3.2. Exploitation de l'exclusion sélective des ions	95
3.2.1. Exclusion sélective des ions et faible teneur des cellules en sodium	95
3.2.2. Activation des enzymes par les ions $K^+$	96
3.3. Exploitation des courants protoniques par les enzymes	96

3.4. Importance biologique des deux couches d'hydratation des macromolécules dans la cellule. Micro-osmose .....	97
3.4.1. Rôle dans la régulation de l'activité biomoléculaire .....	97
3.4.2. Rôle dans l'exactitude de la reconnaissance moléculaire .....	98
3.4.3. Effets mécaniques .....	98
4. Avantage du surpeuplement moléculaire pour la cellule .....	101
5. Circulation de l'eau au sein de la cellule .....	102
5.1. Autodiffusion de l'eau dans la cellule .....	102
5.2. Régulation de la teneur hydrique des cellules .....	104
Conclusion .....	105
Références bibliographiques .....	105

## *Deuxième partie*

### **L'eau dans les réactions chimiques et les processus physiques d'évolution des aliments**

#### *Chapitre 5*

#### **Rôle de l'eau dans les réactions d'altération des aliments**

*(Denis Lorient, Gérard Tainturier)* ..... 113

Introduction .....	113
1. Réactivité de l'eau dans les principales réactions d'hydrolyse des aliments .....	113
1.1. Réactions concernées .....	113
1.2. Réaction d'hydrolyse .....	114
1.2.1. Caractère nucléophile de l'eau, influence de la valeur du pH .....	114
1.2.2. Mécanisme d'hydrolyse des dérivés d'acides carboxyliques : esters et amides .....	115
1.2.3. Hydrolyse des osides .....	120
2. Effets indirects de la présence d'eau sur les réactions d'altération des constituants alimentaires .....	121
2.1. L'eau, milieu dispersant des réactions chimiques et enzymatiques .....	121
2.2. Réactions d'oxydation .....	122
2.3. Réactions de condensation .....	124
2.3.1. Réactions de plastéination .....	124
2.3.1. Réactions de condensation entre protéines et glucides (réactions de Maillard) .....	125
2.4. L'eau et son rôle conformationnel dans la réactivité des macromolécules .....	127
2.4.1. Rôle de l'eau dans la conformation des protéines et des polysaccharides .....	127
2.4.2. Rôle de l'eau dans la structure des protéines : cas de la dénaturation des enzymes .....	127
2.4.3. Procédés de stabilisation des enzymes .....	129
Conclusion .....	130
Références bibliographiques .....	130

## Chapitre 6

<b>L'eau, facteur de mobilité dans l'évolution de la structure physique de l'aliment et cinétiques de réaction</b> ( <i>Martine Le Meste, Gaëlle Roudaut, Dominique Champion, Denise Simatos</i> )	133
Introduction	133
1. Mobilité moléculaire dans un solide amorphe vitrifié	134
1.1. Relaxations secondaires ou mouvements locaux	135
1.2. Vieillissement physique des verres	135
2. Mobilité des macromolécules au-dessus de la température de transition vitreuse	136
3. Diffusion de solutés dans les milieux concentrés	137
4. Mobilité de l'eau	141
4.1. Mobilité de l'eau dans des milieux vitreux	141
4.3.1. Mobilité rotationnelle	141
4.3.2. Diffusion translationnelle	141
4.2. Mobilité de l'eau dans des solutions diluées ou concentrées	141
5. Mobilité moléculaire et qualité des aliments	142
5.1. Transferts d'eau et de solutés dans un aliment « multi-domaines »	143
5.2. Encapsulation de solutés fragiles dans des matrices vitreuses	144
5.3. Structure et texture des aliments	145
5.3.1. Plastification – antiplastification par l'eau	145
5.3.2. Effondrement de structure des produits poreux et agglomération des poudres	146
5.3.3. Cristallisation	147
5.4. Réactions chimiques en milieu peu hydraté	149
Conclusion	151
Références bibliographiques	152

## Troisième partie

## Rôle de l'eau dans les propriétés sensorielles des aliments

## Chapitre 7

<b>Propriétés structurantes de l'eau dans les produits à structure cellulaire : muscle, viande et produits carnés</b> ( <i>Éric Dufour, Jean-Pierre Renou</i> )	159
1. Caractéristiques et propriétés de la cellule musculaire	159
1.1. Structure de la cellule musculaire	159
1.2. Hydrophobie de surface des protéines (myosine)	165
1.3. Solubilité de la myosine en fonction de la force ionique	167
2. Facteurs biologiques	168
2.1. Entrée en <i>rigor</i> du muscle squelettique	168
2.2. Type métabolique	169
2.3. Effet race	169
2.4. Facteurs extrinsèques : conditions d'élevage et d'abattage	170
3. Facteurs technologiques	171

3.1. Changement d'état de l'eau .....	171
3.1.1. Transfert d'eau au cours de la <i>rigor mortis</i> .....	171
3.1.2. Évaporation, congélation, cuisson .....	173
3.2. Modification de la pression osmotique .....	175
3.2.1. Lors de l'entrée en <i>rigor</i> .....	175
3.2.2. Lors du saumurage .....	176
3.3. Effet des hautes pressions .....	177
3.3.1. Principes généraux .....	178
3.3.2. Sur les constituants .....	179
3.3.3. Sur les qualités organoleptiques de la viande .....	181
Conclusion .....	182
Références bibliographiques .....	182

### Chapitre 8

#### **Propriétés structurantes de l'eau dans les légumes et dans les fruits – Influence sur la texture (Bernard Colas)** .....

Introduction .....	189
1. Caractéristiques et spécificités du végétal .....	190
1.1. Cellule végétale .....	191
1.2. De la cellule au tissu .....	192
1.3. Aspects physiologiques : croissance et maturation .....	192
2. Pouvoir structurant de l'eau .....	193
2.1. L'eau dans le tissu végétal .....	193
2.2. Pression osmotique vacuolaire et turgescence .....	194
2.3. Maturation et propriétés de texture .....	195
2.4. Pouvoir structurant des cellules en suspension .....	196
3. Évolution du pouvoir texturant de l'eau au cours de la conservation et de la transformation .....	197
3.1. Conservation et distribution à l'état frais .....	197
3.1.1. Cas des végétaux entiers .....	197
3.1.2. Conservation des végétaux prêts à l'emploi (4 <sup>e</sup> gamme) .....	199
3.2. Traitements thermiques et congélation .....	200
3.2.1. Traitements thermiques .....	200
3.2.2. Congélation .....	202
3.3. Vers de nouveaux procédés .....	203
Conclusion .....	204
Références bibliographiques .....	205

### Chapitre 9

#### **Rôle de l'eau dans les propriétés sensorielles des aliments – Produits peu hydratés, solides ou pâteux, compacts ou alvéolés : produits de cuisson céréaliers et de confiserie : rôle sur la texture (Paul Colonna)** .....

Introduction .....	207
1. Caractéristiques sensorielles .....	210
1.1. Définitions .....	210
1.2. Méthodologies .....	213

2. Produits de confiserie .....	214
2.1. Échelle moléculaire .....	214
2.2. Échelle particulaire .....	215
2.3. Voies d'intervention .....	216
3. Produits peu hydratés, solides ou pâteux, compacts ou alvéolés : produits de cuisson céréaliers ou de confiserie .....	217
3.1. Maîtrise du moelleux .....	217
3.1.1. Mécanismes moléculaires .....	218
3.1.2. Voies d'intervention .....	221
3.2. Maîtrise du croustillant .....	222
3.2.1. Mécanismes .....	223
3.2.2. Voies d'intervention .....	230
3.3. Fêle .....	230
4. Conclusion .....	231
Références bibliographiques .....	232

### Chapitre 10

<b>L'eau dans les produits laitiers (Sylvie Banon, Joël Hardy)</b> .....	235
Introduction .....	235
1. L'eau dans les micelles de caséine .....	236
1.1. Hydratation des micelles de caséine .....	236
1.1.1. Modèles de structure des micelles de caséine .....	238
1.1.2. Influence de la composition (quantitative et qualitative) en monomères caséiques .....	238
1.2. Influence de l'environnement physicochimique sur l'hydratation des micelles de caséine .....	240
1.2.1. Influence de la température sur l'hydratation .....	240
1.2.2. Effet de l'addition de solutés sur l'hydratation caséique .....	241
2. L'eau dans les gels caséiques .....	242
2.1. Formation des gels .....	242
2.1.1. Perte de stabilité colloïdale des micelles de caséine .....	242
2.1.2. Acidification du lait et action combinée de l'acidification et de la présure .....	243
2.1.3. Hydratation des particules caséiques, agrégation et gélification .....	244
2.2. Structure des gels caséiques et synérèse .....	246
3. Hydratation des fromages .....	247
3.1. Teneur en eau et activité de l'eau des fromages .....	247
3.2. L'eau liée des fromages .....	251
3.2.1. Effets de l'égouttage et du salage .....	251
3.2.2. Évolution pendant l'affinage .....	252
Conclusion .....	253
Références bibliographiques .....	255

### Chapitre 11

<b>Texturation par congélation</b> ( <i>Geneviève Blond</i> )	259
Introduction	259
1. Mise en place de la texture (des cristaux de glace)	259
1.1. Aspects thermodynamiques	259
1.1.1. Notions d'équilibre thermodynamique	260
1.1.2. Thermodynamique des changements d'état d'un corps pur	260
1.1.3. Transition liquide $\leftrightarrow$ solide de l'eau pure	260
1.1.4. Équilibres thermodynamiques des solutions aqueuses	262
1.2. Aspects cinétiques	264
1.2.1. Nucléation	264
1.2.2. Croissance des cristaux de glace	268
2. Stabilité de la texture	270
2.1. Maturation d'Oswald	271
2.2. Accrétion, coalescence	271
2.3. Fusion – cristallisation	272
3. Stratégie pratique	272
3.1. Contrôle de la nucléation	272
3.2. Contrôle de la croissance cristalline	273
3.3. Conserver un système sans glace	274
4. Texturation par congélation	275
4.1. Texture des glaces	275
4.1.1. Congélation des glaces : texturation du produit	275
4.1.2. Stockage	277
4.1.3. Influence de la formulation sur la texture	277
4.1.4. Prise en compte de ces facteurs lors de la formulation	279
4.2. Cryogels	279
4.3. Cryobroyage	282
Conclusion	282
Références bibliographiques	282

### Chapitre 12

<b>Rôle de l'eau dans la perception des saveurs</b> ( <i>Frédérique Hutteau, Mohamed Mathlouthi, Gordon G. Birch</i> )	285
1. Introduction	285
1.1. Théories de la chimioréception basées sur la physicochimie du milieu aqueux	285
1.2. Saveur sucrée	286
1.3. Saveur amère	287
1.4. Saveur acide	288
1.5. Saveur salée	288
2. Propriétés des solutions aqueuses utiles à la compréhension du mécanisme de la saveur	289
2.1. Méthodes macroscopiques	289
2.1.1. Viscosimétrie : détermination de la viscosité intrinsèque [h] et du coefficient de Huggins $k'$	289

2.1.2. Volumétrie	290
2.1.3. Propriétés interfaciales : angle de contact – travail d'adhésion	290
2.1.4. Balance hydrophile/lipophile (HLB)	291
2.1.5. Compressibilité	291
2.2. Méthodes microscopiques	292
2.2.1. Spectroscopie Raman-laser	292
2.2.2. Spectroscopie IRTF	293
3. Application à la saveur sucrée	293
3.1. Propriétés d'hydratation	293
3.2. Propriétés volumiques	295
3.2.1. Volume spécifique apparent	296
3.2.2. Parachore	297
3.3. Propriétés de surface/hydrophobie	298
3.4. Cas des mélanges sucres/édulcorants	299
3.4.1. Propriétés spectroscopiques	300
3.4.2. Propriétés interfaciales	300
3.4.3. Mesures de compressibilité	301
3.5. Inhibition de la saveur sucrée	302
3.6. Interaction sucré/salé	303
3.7. Interaction sucré/amer	304
3.8. Interaction sucré/acide	305
Conclusion	305
Références bibliographiques	306

### Chapitre 13

#### Rôle de l'eau dans le comportement des substances d'arôme en milieu aqueux, peu hydraté, émulsionné et gélifié

(Anne-Marie Seuvre, Isabelle Goubet, Andrée Voilley) 313

Introduction	313
1. Caractéristiques physicochimiques des composés d'arôme	314
1.1. Pression de vapeur saturante	314
1.2. Solubilité des composés d'arôme dans l'eau	314
1.3. Hydrophobicité	314
1.4. Volatilité et coefficient d'activité	315
2. Interactions physicochimiques en milieu aqueux	318
2.1. Définition et mise en évidence	318
2.2. Rétention des composés d'arôme par les protéines	320
2.2.1. Types d'interactions	320
2.2.2. Effet de l'hydratation des protéines sur la rétention des composés d'arôme	322
2.3. Effet de l'hydratation des polysides sur la rétention des composés volatils	324
2.3.1. Interactions pour de faibles teneurs en eau	324
2.3.2. Interactions pour de fortes teneurs en eau	325
2.4. Rétention de mélanges d'arôme en présence d'eau	327
3. Cinétique de transfert d'arômes dans des systèmes polyphasiques	328
3.1. Transfert de composés d'arôme à l'interface air-solution aqueuse	329
3.2. Transfert des composés d'arôme à l'interface lipide-solution aqueuse	331

3.3. Transfert de composés d'arôme au travers d'une phase lipidique .....	332
3.4. Effets de la composition et de la structure du milieu sur la libération de composés d'arôme .....	336
3.5. Influence de l'état physique de la matrice .....	339
Conclusion .....	341
Remerciements .....	341
Références bibliographiques .....	342

## *Quatrième partie*

### **L'eau et les procédés**

#### *Chapitre 14*

### **L'eau facteur de stress pour les micro-organismes**

*(Laurent Beney, Patrick Gervais)* ..... 349

Introduction .....	349
1. Qu'est-ce qui provoque les mouvements d'eau entre la cellule et son milieu ? .....	350
1.1. Notion de potentiel hydrique .....	350
1.2. Relation entre les potentiels hydriques intra et extracellulaire .....	350
2. Caractérisation de la réponse passive des micro-organismes à la déshydratation .....	351
2.1. La déshydratation peut provoquer d'importantes diminutions de volume cellulaire .....	351
2.2. La réponse passive de la cellule à la déshydratation est une variation rapide du volume cellulaire .....	354
2.3. Modifications cellulaires causées par la réponse passive à la déshydratation .....	357
3. Réponse active des cellules à la déshydratation .....	358
3.1. Régulation du volume cellulaire par la synthèse intracellulaire de solutés osmocompatibles .....	358
3.2. Stabilisation des structures cellulaires par la synthèse de solutés osmoprotectants .....	359
3.3. Réaction cellulaire par l'activation protéique .....	360
4. Influence des variations d'hydratation du milieu sur la viabilité cellulaire .....	360
4.1. Limites de la viabilité chez <i>S. cerevisiae</i> en fonction du niveau de pression osmotique du milieu .....	361
4.2. Influence de la cinétique de déshydratation sur la variation de volume cellulaire .....	361
4.3. Influence de la cinétique de déshydratation sur la viabilité de <i>S. cerevisiae</i> .....	362
4.4. L'impact d'un stress hydrique sur les micro-organismes est fonction de son amplitude et de son intensité .....	364
Conclusion .....	365
Références bibliographiques .....	365

## Chapitre 15

**Eau vecteur de stress thermiques et hyperbares pour les micro-organismes**

(Jean-Marie Perrier-Cornet, Patrick Gervais) \_\_\_\_\_ 369

Introduction .....	369
1. Mode d'action de la température et de la pression hydrostatique .....	369
1.1. Pression et température agissent différemment dans la matière .....	369
1.2. Processus énergétiquement très différents .....	371
1.3. Pression et température révèlent le comportement atypique de l'eau .....	371
1.3.1. L'eau dans tous ses états .....	372
1.3.2. Singularités de l'eau .....	372
1.4. Action sur les biomolécules hydratées .....	373
1.4.1. Dénaturation des macromolécules en solution .....	373
1.4.2. Changement d'état des lipides .....	374
2. Stress hydrothermal et hydrobare des micro-organismes .....	375
2.1. Historique .....	375
2.2. Effets de la pression et de la température sur les micro-organismes et rôle de l'hydratation du milieu .....	375
2.2.1. La croissance microbienne est possible dans un vaste domaine de pression et de température .....	375
2.2.2. Pressions et températures létales : un niveau énergétique minimum .....	376
2.2.3. Inactivation hydrobare ou hydrothermale : le rôle essentiel du milieu .....	377
2.3. Phénomènes expliquant l'inactivation des micro-organismes en milieu hydraté .....	380
2.3.1. La dénaturation protéique contribue à l'inactivation physique des micro-organismes ou le rapport entre « <i>in vitro</i> » et « <i>in vivo</i> » .....	380
2.3.2. Perturbation fonctionnelle et mécanique de la membrane .....	381
Conclusion .....	382
Références bibliographiques .....	383

## Chapitre 16

**Influence des conditions d'hydratation sur la physiologie  
des micro-organismes : croissance, survie**

(Suzanne Bakan, Bernard Cahagnier) \_\_\_\_\_ 387

Introduction .....	387
1. Disponibilité de l'eau : notion d' $A_w$ .....	387
1.1. $A_w$ et mesure de l' $A_w$ .....	387
1.2. $A_w$ et pression osmotique .....	388
1.3. $A_w$ et teneur en eau .....	388
2. Comportement des micro-organismes aux $A_w$ réduites .....	390
2.1. Croissance .....	390
2.2. Autres caractéristiques physiologiques .....	391
2.2.1. $A_w$ et production de toxines .....	391
2.2.2. Thermorésistance .....	392
2.2.3. Résistance aux antibiotiques .....	392
2.3. $A_w$ et autres facteurs du milieu .....	392

3. Phénomènes d'adaptation .....	393
3.1. Accumulation de solutés compatibles .....	393
3.1.1. Rôle des cations .....	393
3.1.2. Accumulation de betaine et de certains acides aminés .....	393
3.1.3. Tréhalose et polyols .....	394
3.2. Adaptations structurales .....	396
3.2.1. Membrane plasmique et paroi .....	396
3.2.2. Enzymes .....	398
3.2.3. Topologie de l'ADN .....	399
Conclusion .....	399
Références bibliographiques .....	399

### Chapitre 17

#### Procédé de déshydratation osmotique

(Philippe Bohuon, Anne-Lucie Raoult-Wack) ..... 405

Introduction .....	405
1. Applications et intérêt de la DII .....	407
2. Variables du procédé .....	409
2.1. Propriétés des tissus biologiques .....	409
2.2. Concentration et composition de la solution .....	410
2.3. Durée de traitement .....	415
2.4. Température .....	415
2.5. Pression .....	416
2.6. Mode de mise en contact des phases .....	417
3. Développement de méthodes de caractérisation et de prédiction de la qualité des produits traités par DII .....	418
3.1. Qualité des produits végétaux traités par DII .....	419
3.2. Qualité des produits d'origine animale traités par DII .....	420
Conclusion .....	420
Références bibliographiques .....	421

### Chapitre 18

**Procédés de congélation** (Geneviève Blond) ..... 429

Introduction .....	429
1. Congélation ou surgélation : rappel des principes généraux .....	429
1.1. Température de conservation .....	430
1.2. Vitesse de congélation .....	431
1.3. Calcul de la durée de la congélation .....	432
1.4. Eau non congelée, eau non congelable .....	433
1.5. Activité de l'eau .....	434
2. Techniques de congélation et qualité des produits .....	435
2.1. Prétraitements .....	435
2.2. Équipements industriels de congélation et milieux d'échanges .....	436
2.2.1. Équipements utilisant le froid « mécanique » .....	436
2.2.2. Froid « cryogénique » .....	438

2.3. Post-traitement .....	438
2.3.1. Pelliculage (givrage, glaçage, azurage, glazurage) .....	438
2.3.2. Emballage .....	438
2.4. Température de stockage et conservation .....	439
2.5. Contrôle qualité .....	440
2.6. Décongélation .....	441
3. Perspectives dans l'amélioration des procédés .....	442
3.1. Répartition de la glace dans le produit .....	442
3.2. Cryoconcentration .....	442
3.3. Coulis de glace (sorbet, fluide diphasique, liquosol) .....	443
Conclusion .....	443
Références bibliographiques .....	444

### Chapitre 19

#### **Procédés de création des produits céréaliers** (*Paul Colonna, Guy Della Valle, François Mabilie, Joël Abecassis, Bernard Cuq*) ..... 447

1. Analyse de la filière des produits céréaliers .....	447
2. Broyage, fractionnement .....	449
2.1. Objectifs technologiques .....	449
2.2. Description des opérations .....	449
2.3. Influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques des tissus du blé ...	450
2.3.1. Modification des propriétés mécaniques des enveloppes (cas du blé tendre) .....	450
2.3.2. Modification des propriétés mécaniques de l'albumen de blé .....	450
2.3.2. Énergie de rupture et énergie de broyage .....	451
2.4. Influence de la teneur en eau sur le comportement des fractions .....	452
2.5. Interactions entre les caractéristiques du grain, son conditionnement et les procédés .....	452
2.5.1. Morphologie des grains et pénétration de l'eau .....	452
2.5.2. Teneur en eau et densité des produits de mouture .....	453
2.5.3. Température et teneur en eau .....	453
2.5.4. Diagramme de mouture et teneur en eau .....	454
2.5.5. Stockage et teneur en eau .....	454
3. Technologies en milieux concentrés .....	455
3.1. Obtention d'une phase fondue homogène .....	455
3.2. Comportement mécanique de la phase fondue .....	456
3.3. Les films, rôle de la transition vitreuse .....	458
3.4. Les mousses solides .....	460
4. Formation et séchage des pâtes .....	463
4.1. Teneur en eau et pâtes céréalieres .....	463
4.2. Des particules de farine (solide) à la pâte (viscoélastique) .....	465
4.2.1. Hydratation des particules .....	465
4.2.2. Développement de la pâte .....	467
4.3. Formation de la pâte : effets cinétiques et effets mécaniques .....	469
4.3.1. Dynamique de l'hydratation .....	469
4.3.2. Découplage des effets cinétiques et mécaniques .....	469

4.4. Séchage des pâtes alimentaires .....	470
5. Des pâtes aux produits de cuisson humide : la panification .....	473
5.1. Pâtes et pains surgelés .....	474
5.2. Maîtrise de la phase gazeuse incluse : l'alvéolation .....	474
5.2.1. Formation des bulles en régime isotherme .....	474
5.2.2. Évolution des alvéoles au cours de la cuisson .....	476
5.3. Transformations moléculaires et mésoscopiques irréversibles .....	480
5.3.1. Gélatinisation .....	481
5.3.2. Transformations hydrothermiques des protéines .....	484
6. Biscuiterie .....	486
6.1. Lipides .....	486
6.2. Sucres .....	486
6.2.1. Solubilité .....	487
6.2.2. Fusion et cristallisation .....	488
6.2.3. Transition vitreuse .....	488
6.4. Action des agents levants .....	489
Conclusion .....	490
Références bibliographiques .....	491

## Chapitre 20

### Procédés thermiques de cuisson et de stabilisation des aliments

(Albert Duquenois) .....	497
Introduction .....	497
1. Cuisson et stabilisation thermiques .....	497
1.1. Objectifs de ces opérations .....	497
1.2. Stabilité, vue du produit .....	497
1.3. Stabilité, vue du consommateur .....	498
2. Effets de la chaleur sur les micro-organismes .....	498
2.1. Notions de pasteurisation et de stérilisation .....	498
2.2. Thermorésistance des micro-organismes .....	499
2.3. Variation des paramètres $DT_{ref}$ et $Z$ .....	500
2.4. Utilisation pratique des lois .....	502
2.4.1. Un contexte difficile à maîtriser .....	502
2.4.2. Calcul des valeurs pasteurisatrice et stérilisatrice des traitements industriels .....	502
3. Effets de la chaleur sur la matière .....	504
3.1. Changements d'état .....	504
3.2. Réactions chimiques .....	504
3.3. Effets sur les vitamines .....	505
3.4. Autres effets .....	506
4. Rôle de l'eau dans les traitements thermiques .....	507
4.1. Traitements thermiques par présence d'un élément chaud ou froid : échange de chaleur .....	508
4.1.1. Cas d'échange de chaleur par contact .....	508
4.1.2. Cas d'un échange sans contact : par rayonnement infrarouge .....	511
4.2. Chauffage sans utilisation de corps chaud : les champs électromagnétiques micro-ondes, hautes fréquences et le chauffage ohmique .....	513

4.2.1. Chauffage ohmique (ou effet Joule) .....	513
4.2.2. Micro-ondes et hautes fréquences .....	513
4.2.3. Hautes fréquences .....	515
4.2.4. Micro-ondes .....	515
4.3. Échauffement interne du produit : transmission et accumulation de chaleur .....	517
4.3.1. Conduction thermique .....	517
4.3.2. Autres modes de transport de chaleur .....	518
4.3.3. La capacité thermique .....	519
4.3.4. L'échauffement .....	519
4.3.5. Rôle de l'eau dans ces phénomènes .....	520
Conclusion .....	522
Références bibliographiques .....	522

### Chapitre 21

#### L'eau en séchage, stockage et réhydratation

(Jean-Jacques Bimbenet, Catherine Bonazzi, Élisabeth Dumoulin) \_\_\_\_\_ 525

Introduction .....	525
1. Procédés de séchage .....	526
1.1. Pression de vapeur de l'eau d'un produit .....	526
1.2. Modes de séchage .....	526
1.3. Diversité des conditions de séchage .....	527
2. Transferts d'eau en séchage .....	530
2.1. Cinétiques de séchage .....	530
2.2. Modes de transfert de matière .....	532
2.2.1. Migration de la vapeur d'eau .....	532
2.2.2. Migration d'eau liquide .....	533
2.3. Distribution et dynamique de l'eau .....	533
2.4. Modélisation du séchage .....	534
3. Phénomènes physicochimiques et mécaniques en séchage .....	535
3.1. Phénomènes physicochimiques en séchage .....	535
3.2. Phénomènes mécaniques .....	537
4. Stockage et manutention .....	538
4.1. Objectifs et paramètres du stockage .....	539
4.2. Emballage et qualité .....	540
4.3. Emballages comestibles .....	540
4.4. Manutention .....	541
5. Réhydratation .....	541
5.1. Diversité de contexte et d'objectifs .....	541
5.2. Phénomènes en jeu .....	542
5.2.1. Stockages et manutentions .....	542
5.2.2. Réhydratation de particules solides. ....	542
5.2.3. Réhydratation de poudres insolubles .....	544
5.2.4. Réhydratation de poudres solubles ou quasi-solubles .....	545
Conclusion .....	545
Références bibliographiques .....	546

## Chapitre 22

### **Procédés de stabilisation des produits alimentaires par les films « barrière »**

(*Frédéric Debeaufort, Andrée Voilley, Stéphane Guilbert*) \_\_\_\_\_ 549

Introduction .....	549
1. Problématique des transferts d'eau .....	550
1.1. Origines et conséquences des transferts d'eau sur la qualité des produits alimentaires .....	550
1.2. Mécanismes du transfert d'eau .....	553
2. Qualités requises et propriétés fonctionnelles des films et enrobages .....	555
3. Composition et structure des films et enrobages comestibles .....	559
3.1. Nature des constituants .....	559
3.2. Films et enrobages homogènes .....	563
3.3. Films et enrobages composites à structure hétérogène .....	564
4. Performances barrière et facteurs influant sur la perméabilité .....	565
4.1. Mesure et valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau .....	565
4.2. Facteurs externes modifiant les propriétés barrière des films et enrobages comestibles .....	572
4.2.1. Influence de la température .....	572
4.2.2. Effet de la concentration et du gradient d'activité de l'eau .....	574
4.3. Paramètres intrinsèques modifiant les propriétés barrière des films et enrobages comestibles .....	576
4.3.1. Influence de l'épaisseur .....	576
4.3.2. Concentration en plastifiant .....	576
4.3.3. Influence de la répartition de la matière grasse dans les films hétérogènes .....	578
4.3.4. Influence de la concentration, de la longueur des chaînes d'acides gras et de leur insaturation, de la forme cristalline et de la teneur en solide des lipides .....	578
5. Prédiction de la durée de conservation optimale des produits enrobés .....	580
6. Techniques de fabrication et d'application des films et enrobages comestibles .....	582
7. Exemples d'applications .....	584
7.1. Produits de confiserie .....	584
7.2. Fruits et légumes .....	585
7.3. Produits carnés, de la mer et dérivés .....	586
7.4. Produits céréaliers, biscuiterie et viennoiserie .....	587
7.5. Aromatisation .....	588
7.6. Produits élaborés .....	589
Conclusion .....	589
Références bibliographiques .....	591

*Cinquième partie*  
**Méthodes analytiques**

*Chapitre 23*

**Détermination de la teneur en eau dans les aliments**

<i>(Heinz-Dieter Isengard)</i>	603
Introduction .....	603
1. Méthodes directes .....	604
1.1. Méthodes basées sur la séparation physique de l'eau .....	604
1.1.1. Dessiccation par transfert de l'eau à d'autres substances .....	604
1.1.2. Distillation .....	604
1.1.3. Séchage à l'étuve .....	605
1.1.4. Séchage aux infrarouges .....	606
1.1.5. Séchage par micro-ondes .....	607
1.2. Méthodes directes basées sur une réaction chimique .....	607
1.2.1. Méthodes au carbure et à l'hydrure de calcium .....	607
1.2.2. Titration de Karl Fischer .....	608
1.3. Méthodes directes combinées .....	610
1.3.1. Évaporation et titration de Karl Fischer .....	610
1.3.2. Évaporation et méthode au pentoxyde de phosphore .....	610
2. Méthodes indirectes .....	611
2.1. Méthodes indirectes basées sur la mesure d'une propriété macroscopique de l'échantillon laquelle dépend de la teneur en eau .....	611
2.1.1. Densimétrie, polarimétrie, réfractométrie, mesures électriques .....	611
2.1.2. Activité de l'eau .....	611
2.2. Méthodes indirectes basées sur la mesure de la réponse des molécules d'eau à une perturbation physique .....	611
2.2.1. Résonance magnétique nucléaire basse résolution .....	612
2.2.2. Spectroscopie dans le proche infrarouge .....	613
2.2.3. Spectroscopie à hyperfréquence .....	614
Références bibliographiques .....	615

*Chapitre 24*

**Méthodes de localisation de l'eau**

<i>(Loïc Foucat, Brigitte Martinie, Jean-Pierre Renou)</i>	619
Introduction .....	619
1. Microscopie électronique .....	621
1.1. Microscopie électronique à balayage .....	621
1.1.1. Description de l'appareillage .....	621
1.1.2. Préparation des échantillons : cryométhodes .....	622
1.1.3. Applications .....	623
1.2. Microscopie électronique à balayage environnemental .....	627
1.2.1. Principe .....	627
1.2.2. Applications .....	629

1.3. Nouvelle approche en microscopie de fluorescence .....	629
2. Imagerie par résonance magnétique nucléaire .....	631
2.1. Principes .....	631
2.1.1. Spin nucléaire et phénomène de résonance .....	631
2.1.2. Signal RMN et temps de relaxation .....	633
2.1.3. Obtention du profil d'un objet .....	634
2.1.4. Obtention d'une image à deux dimensions (image 2-D) .....	636
2.1.5. Sélection d'une tranche dans un objet .....	637
2.1.6. Image tridimensionnelle (image 3-D) .....	637
2.2. Appareillage IRM et séquence d'acquisition .....	637
2.2.1. Spectromètre .....	637
2.2.2. Séquence d'écho de spin .....	638
2.3. Facteurs affectant la qualité des images IRM .....	638
2.3.1. Facteurs extrinsèques .....	638
2.3.2. Facteurs intrinsèques .....	640
2.3.3. Déformations des échantillons .....	640
2.4. Applications de l'IRM en science des aliments .....	640
2.4.1. Procédés technologiques .....	640
2.4.2. Composition, structure et qualité .....	644
Conclusion .....	647
Références bibliographiques .....	647

### *Sixième partie*

#### **Perspectives**

<i>Denise Simatos</i> .....	653
Distribution de l'eau dans les produits .....	655
Méthodes de contrôle non invasives .....	656
Micro-organismes et eau .....	656
Rôle de l'eau dans la rétention et la libération de composés adsorbés ou encapsulés .....	657
Références bibliographiques .....	657

<b>Index</b> .....	659
--------------------	-----