

Laurent Bazinet · François Castaigne



Concepts de génie alimentaire

Procédés associés et applications
à la conservation des aliments

Concepts de génie alimentaire

Procédés associés

et applications à la conservation des aliments

Laurent Bazinet

François Castaigne



11 rue Lavoisier
75008 Paris

Chez le même éditeur

Génie des procédés appliqués à l'industrie laitière

R. Jeantet, G. Brulé, G. Delaplace, 2^e édition, 2011

Polyphénols et procédés : transformation des polyphénols au travers des procédés appliqués à l'agro-alimentaire

S. Collin, J. Crouzet, coll. AUF, 2011

Sciences des aliments. Biochimie, microbiologie, procédés, produits.

Volume 1 : stabilisation biologique et physico-chimique

R. Jeantet, T. Croguennec, P. Schuck, G. Brulé, 2006

Sciences des aliments. Biochimie, microbiologie, procédés, produits.

Volume 2 : technologie des produits alimentaires

R. Jeantet, T. Croguennec, P. Schuck, G. Brulé, 2006

Génie industriel alimentaire. Tome 2 : techniques séparatives

P. Mafart, E. Béliard, 2^e édition, 2004

Génie industriel alimentaire. Tome 1 : procédés physiques de conservation

P. Mafart, 2^e édition, 1997



© Lavoisier, 2011

ISBN : 978-2-7430-1393-6

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands Augustins – 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, d'autre part les analyses et courtes citations justifiées dans le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 – art. L. 122-4 et L. 122-5 et Code pénal art. 425).

Table des matières

Introduction.....	1
-------------------	---

Première partie

Principes de conservation et notions préliminaires

Chapitre 1

L'activité de l'eau en conservation des aliments

1. L'activité de l'eau.....	7
1.1 Définition.....	7
1.2 Relation a_w et humidité relative.....	8
1.3 Loi de Raoult.....	9
1.4 Mesure de l'activité de l'eau.....	10
2. Les isothermes de sorption.....	11
2.1 Définition et relation avec la valeur d' a_w	11
2.2 Courbes de désorption et d'adsorption.....	11
2.3 Hystérésis.....	13
2.4 Détermination théorique de la couche d'eau monomoléculaire.....	14
2.5 Relation entre isotherme de sorption et entreposage d'un aliment.....	16
3. Relation entre l'activité de l'eau et la détérioration des aliments.....	18
3.1 Catégories d'aliments et activité de l'eau.....	18
3.2 Réactions de détérioration des aliments liées à l' a_w	20
3.2.1 Oxydation des lipides.....	20
3.2.2 Brunissement non enzymatique.....	21
3.2.3 Réactions enzymatiques.....	21
3.2.4 Croissance des microorganismes.....	22
3.3 Comment baisser l'activité de l'eau.....	23
3.4 Les produits à humidité intermédiaire.....	24
3.4.1 Procédé dit d'infusion humide.....	24
3.4.2 Procédé dit de mélange.....	26
Conclusion.....	29
Bibliographie.....	30

Chapitre 2

Cinétique de réaction et paramètres de prédiction de la durée de vie des aliments

1. Vitesse et ordre de la réaction.....	32
1.1 Vitesse de réaction.....	32
1.2 Ordre de la réaction.....	33
1.2.1 Réaction d'ordre zéro.....	33
1.2.2 Réaction d'ordre un.....	36
1.2.3 Réaction d'ordre deux.....	38
1.2.4 Réaction d'ordre trois.....	39

2.	Impact de la température sur la constante de réaction.....	43
2.1	Énergie d'activation	43
2.1.1	Définition.....	43
2.1.2	Niveau énergétique de la réaction	43
2.1.3	Énergie d'activation et chauffage thermique.....	44
2.2	La loi d'Arrhénius	45
3.	Effet des conditions environnementales.....	47
3.1	Valeur Q_{10}	47
3.2	Généralisation de la valeur du Q_{10} en fonction de la température.....	50
4.	La destruction ou l'inactivation en fonction du temps	51
4.1	Cinétique de la réaction	51
4.2	Le temps de réduction décimale (D)	52
5.	La destruction ou l'inactivation en fonction de la température.....	53
5.1	Cinétique de réaction.....	53
5.2	La valeur Z.....	55
	Conclusion	58
	Bibliographie	58

Chapitre 3

Fluides et écoulements

1.	Types d'écoulement des fluides.....	59
1.1	Définition	59
1.2	Écoulement newtonien	60
1.3	Écoulement non newtonien	60
1.4	Écoulements plastique et quasiplastique.....	61
2.	Viscosimétrie	64
3.	Écoulement des fluides newtoniens et non newtoniens	68
3.1	Écoulement des fluides newtoniens.....	68
3.2	Écoulement des fluides non newtoniens.....	71
	Bibliographie	72

Chapitre 4

Propriétés thermophysiques des aliments

1.	La chaleur	73
1.1	La chaleur massique C_p	73
1.1.1	Au-dessus du point de congélation de l'aliment.....	74
1.1.2	En dessous du point de congélation de l'aliment	78
1.2	La chaleur latente C_L	80
2.	Masse volumique (ρ).....	81
2.1	Si on ne connaît que la teneur en eau	81
2.2	Si on connaît la composition de l'aliment	81
2.2.1	Au-dessus du point de congélation de l'aliment.....	81
2.2.2	En dessous du point de congélation de l'aliment	82
3.	Conductivité thermique (K).....	83
3.1	Au-dessus du point de congélation de l'aliment	84
3.1.1	Si on ne connaît que le pourcentage d'eau	84
3.1.2	Si on connaît le pourcentage d'eau et la température	85
3.1.3	Si on connaît la composition de l'aliment et la température (T)	85
3.2	En dessous du point de congélation de l'aliment.....	85
3.2.1	Si on connaît le pourcentage d'eau W.....	85

3.2.2	Si on connaît la température de congélation commençante ou de changement d'état (T_c) et la température du produit congelé (T)	86
4.	Diffusivité thermique (α).....	87
4.1	Au-dessus du point de congélation de l'aliment.....	88
4.1.1	Si on connaît le pourcentage d'eau	88
4.1.2	Si on connaît le pourcentage d'eau (W), le pourcentage de gras (F) et la température (T)	88
4.2.	En dessous du point de congélation de l'aliment.....	88
	Bibliographie	89

Chapitre 5

Bilans de matière et d'énergie

1.	Les bilans de matière	91
1.1	Principe du bilan de matière	91
1.1.1	Définitions générales et base de calcul.....	91
1.1.2	Bilan de matière global	93
1.1.3	Bilan de matière sur les composants	94
1.2	Bilan de matière relatif à la dilution, la concentration et la déshydratation	96
1.2.1	Dilution	96
1.2.2	Concentration.....	97
1.2.3	Séchage.....	97
1.3	Bilan de matière dans les mélanges de produits	98
2.	Énergie et bilan d'énergie.....	101
2.1	Définitions.....	101
2.1.1	La chaleur	101
2.1.2	Énergie consommée pour produire de la chaleur	101
2.2	Vapeur saturante et utilisation des tables de vapeur saturante	103
2.3	Bilans d'énergie.....	108
	Bibliographie	109

Chapitre 6

Transfert de chaleur

1.	Les transferts de chaleur	111
2.	Les modes de transfert de chaleur.....	112
2.1	Transfert de chaleur par conduction	112
2.1.1	Définition	112
2.1.2	Taux de transfert de chaleur par conduction	113
2.2	Transfert de chaleur par convection	115
2.2.1	Définition	115
2.2.2	Taux de transfert de chaleur par convection.....	115
2.3	Transfert de chaleur par radiation.....	116
2.3.1	Définition	116
2.3.2	Taux de transfert de chaleur par radiation.....	117
3.	Transferts de chaleur stationnaires.....	117
3.1	Transfert par conduction dans un corps solide : cas général.....	117
3.2	Transfert de chaleur par conduction à travers des couches successives.....	119
3.3	Transfert par conduction à travers la paroi d'un tuyau	121
3.4	Transfert par conduction à travers la paroi d'un tuyau multicouche.....	124
3.5	Cas de transferts de chaleur combinés (conduction-convection) à travers une paroi entourée de deux fluides.....	125

3.6	Cas de transferts de chaleur combinés (convection-conduction) à travers la paroi d'un tuyau	128
3.7	Détermination des coefficients de transfert de chaleur par convection h.....	132
3.7.1	Invariants de similitude	132
3.7.2	Équations permettant de calculer le coefficient de transfert de chaleur par convection h.....	136
3.8	Corps chauffé par une source radiante : cas général	141
3.9	Taux de transfert par radiation entre deux objets.....	143
3.9.1	Transfert de chaleur par radiation et facteur de forme	143
3.9.2	Évaluation du facteur de forme	144
4.	Transferts de chaleur non stationnaires.....	149
4.1	Chauffage et refroidissement de produits alimentaires solides	150
4.1.1	Transferts de chaleur et résistances thermiques associées.....	150
4.1.2	Approche expérimentale de la cinétique de variation de la température dans l'aliment.....	152
4.1.3	Relation entre la cinétique de variation de la température expérimentale et théorique.....	154
4.1.4	Transfert de chaleur non stationnaire dans des solides ayant la forme d'un parallélépipède rectangle et d'un cylindre fini	157
4.2	Chauffage et refroidissement de produits alimentaires liquides	161
	Bibliographie	162
	Annexes	164

Chapitre 7

Notions générales sur les mélanges air-vapeur d'eau

1.	Humidité relative	167
2.	Mélange air-vapeur d'eau	168
3.	Température du thermomètre humide T_h	169
4.	Enthalpie de l'air humide.....	173
5.	Utilisation du diagramme enthalpique de l'air humide ou diagramme psychrométrique	175
5.1	Diagramme enthalpique.....	175
5.2	Détermination de la température de rosée T_r	178
5.3	Détermination de la température du thermomètre humide T_h	179
5.4	Détermination de la teneur en eau de l'air lors du chauffage de l'air	180
5.5	Détermination de l'enthalpie de l'air	181
6.	Détermination des caractéristiques d'un mélange d'air	182
7.	Cas du séchage par entraînement d'air : méthode approchée.....	184
7.1	Bilan de matière	184
7.2	Bilan d'énergie	184
	Bibliographie	187

Chapitre 8

Transfert de masse

1.	Les transferts de masse	189
2.	Les modes de transfert de masse.....	190
2.1	Transfert de masse par diffusion	190
2.1.1	Définition	190
2.1.2	Taux de transfert de masse par diffusion.....	191
2.2	Transfert de masse par convection	194
2.2.1	Définition	194
2.2.2	Taux de transfert de masse par convection.....	195

2.3	Transfert de masse par migration	196
2.3.1	Définition	196
2.3.2	Taux de transfert de masse par migration	196
3.	Transferts de masse stationnaires.....	197
3.1	Transfert de masse par diffusion dans un corps : cas général	197
3.1.1	Cas des liquides	198
3.1.2	Cas des gaz.....	199
3.2	Transfert de masse par diffusion à travers des couches successives.....	205
3.2.1	Cas des liquides	205
3.2.2	Cas des gaz.....	207
3.3	Transfert de masse par diffusion dans un cylindre	209
3.3.1	Cas des liquides	209
3.3.2	Cas des gaz.....	211
3.4	Cas de transferts de masse combinés (diffusion-convection) à travers une paroi plane	212
3.4.1	Cas des liquides	212
3.4.2	Cas des gaz.....	214
3.5	Cas de transferts de masse combinés (diffusion-convection) à travers la paroi d'un tuyau	215
4.	Estimation des coefficients de transferts de masse par convection.....	218
4.1	Invariants de similitude	218
4.1.1	Le nombre de Reynolds : N_{Re}	218
4.1.2	Le nombre de Sherwood : N_{Sh}	218
4.1.3	Le nombre de Schmidt : N_{Sc}	219
4.1.4	Le nombre de Lewis : N_{Le}	219
4.1.5	Le nombre de Biot : N_{Bi}	219
4.2.	Équations permettant de calculer le coefficient de transfert de masse par convection.....	220
4.2.1	Cas d'un fluide s'écoulant dans un tuyau.....	220
4.2.2	Cas d'un fluide s'écoulant parallèlement à une paroi plane	220
4.2.3	Cas d'un fluide s'écoulant autour d'une sphère	221
4.2.4	Cas d'une cuve munie d'un agitateur	222
5.	Transferts de masse non stationnaires.....	222
5.1	Diffusion transitoire	223
5.2	Diffusion des gaz.....	226
	Bibliographie	228

Seconde partie

Opérations unitaires et procédés de conservation

Chapitre 9

Échangeur de chaleur

1.	Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur.....	231
1.1	Fonctionnement d'un échangeur de chaleur	231
1.2	Profil de température	233
2.	Différents types d'échangeurs de chaleur	233
2.1	Les échangeurs de chaleur à plaques	233
2.1.1	Généralités	233
2.1.2	Modes de fonctionnement.....	234
2.1.3	Configurations	234
2.1.4	Autres paramètres importants des échangeurs de chaleur à plaques	236
2.2	Les échangeurs de chaleur à spirale.....	237
2.3	Les échangeurs de chaleur à surface raclée	237

2.4	Les échangeurs de chaleur tubulaires	238
2.5	Les échangeurs de chaleur par infusion vapeur	239
3.	Transfert de chaleur et évaluation de la taille	240
3.1	Coefficient de transfert de chaleur global	241
3.2	Paramètres impliqués dans l'évaluation de la taille d'un échangeur de chaleur	241
3.3	Récupération de chaleur	246
3.3.1	Conceptualisation d'un échangeur à plaque avec section de récupération	246
3.3.2	Calcul du taux de récupération.....	246
	Bibliographie	249

Chapitre 10

Le blanchiment

1.	Buts du blanchiment et effets sur l'aliment.....	251
1.1	L'inactivation des enzymes	251
1.2	Autres fonctions du blanchiment.....	252
1.3	Les inconvénients du blanchiment.....	252
2.	Les procédés de blanchiment	253
2.1	Les blancheurs à eau.....	253
2.2	Les blancheurs à vapeur	255
3.	Durée et température de blanchiment	256
3.1	Les transferts de chaleur.....	256
3.2	Résistance au transfert de chaleur.....	257
	Bibliographie	261

Chapitre 11

La pasteurisation et la stérilisation des aliments

1.	La pasteurisation.....	263
1.1	But de la pasteurisation, applications et effets sur l'aliment.....	263
1.1.1	Destruction des microorganismes et barèmes de pasteurisation.....	263
1.1.2	Applications	264
1.1.3	Les effets sur les aliments	264
1.2	Les procédés de pasteurisation	265
1.3	Durée et température de pasteurisation.....	266
1.3.1	Les calculs reliés à la pasteurisation des aliments liquides	266
1.3.2	Les calculs reliés à la pasteurisation des aliments solides.....	270
2.	La stérilisation des aliments.....	271
2.1	But de la stérilisation et effet sur l'aliment.....	271
2.1.1	La destruction des microorganismes	271
2.1.2	Les effets sur les aliments	271
2.2	Les procédés de stérilisation.....	273
2.2.1	Les autoclaves discontinus.....	273
2.2.2	Les autoclaves continus	278
2.3	Barème de stérilisation	282
2.3.1	La valeur stérilisatrice.....	283
2.3.2	Étude de la pénétration de la chaleur dans une boîte de conserve.....	289
2.3.3	Calcul de la valeur létale d'un traitement thermique.....	299
2.3.4	Changement dans les conditions de stérilisation	312
2.3.5	Refroidissement des boîtes de conserves	316
2.3.6	Méthode d'ajustement des barèmes de stérilisation	319

2.4	Stérilisation d'aliments faiblement acides dans les procédés continus à remplissage aseptique	319
2.4.1	Détermination du temps de stérilisation dans le cas des produits liquides	319
2.4.2	Détermination du temps de stérilisation dans le cas des produits liquides contenant des morceaux solides	321
	Conclusion	326
	Bibliographie	326

Chapitre 12

La réfrigération et l'entreposage réfrigéré

1.	Introduction	327
2.	Refroidissement des viandes	327
2.1	Morphologie du muscle	327
2.2	Rigidité cadavérique et maturation	328
2.3	Réfrigération des viandes	330
3.	Entreposage des fruits et légumes	333
3.1	Refroidissement et entreposage réfrigéré	333
3.2	Entreposage sous atmosphère contrôlée ou modifiée	336
4.	Besoins frigorifiques	337
4.1	Pertes d'énergie à travers les parois de l'entrepôt	338
4.2	Pertes d'énergie à travers les fissures	340
4.3	Pertes d'énergie par renouvellement d'air	340
4.4	Pertes d'énergie par les portes	341
4.5	Perte d'énergie par production de chaleur à l'intérieur de l'entrepôt	342
4.6	Pertes d'énergie dues à la respiration des fruits et légumes	342
4.7	Évaluation de la quantité d'énergie à retirer du produit pour baisser sa température à celle de l'entrepôt	345
4.8	Puissance de l'installation frigorifique	346
	Bibliographie	348

Chapitre 13

Congélation des aliments

1.	Introduction	349
2.	Formation des cristaux de glace	349
2.1	Nucléation et taille des cristaux	349
2.2	Recristallisation	350
3.	Effet de la congélation sur l'aliment	351
3.1	Diagramme de phases de l'eau et eutectique	351
3.2	Effet sur l'eau non congelée	355
3.3	Effet sur la structure cellulaire	355
3.4	Détérioration de l'aliment pendant la congélation et l'entreposage à l'état congelé	356
4.	Procédés de congélation	357
4.1	Congélateurs où la production de froid est mécanique	357
4.1.1	Congélateurs à air	357
4.1.2	Congélateur par immersion	358
4.1.3	Les congélateurs par contact avec une surface froide	359
4.2	Congélation cryogénique	362
5.	Thermodynamique de la congélation	364
5.1	Température de congélation commençante T_e	365
5.2	Pourcentage d'eau congelée	367

5.3	Variation de l'enthalpie durant la congélation.....	368
6.	Évaluation des temps de congélation.....	370
6.1	Méthode de Plank.....	371
6.2	Méthode de Plank modifiée.....	374
6.2.1	Évaluation de t_f	376
6.2.2	Évaluation de t_c	377
6.2.3	Évaluation de t_e	377
7.	Vitesse de congélation.....	384
8.	Évolution de la qualité au cours de l'entreposage.....	384
9.	Décongélation.....	390
	Bibliographie.....	390

Chapitre 14

Concentration par évaporation

1.	Principe et types d'évaporateurs.....	391
1.1	Principe.....	391
1.2	Les différents types d'évaporateurs.....	392
1.2.1	Évaporateur à flot grim pant.....	393
1.2.2	Évaporateurs à flot descendant.....	394
1.2.3	Évaporateurs spiralés.....	394
1.2.4	Évaporateur à plaques.....	395
1.2.5	Évaporateurs à surface raclée.....	395
2.	Bilans d'énergie et de matière.....	396
2.1	Les bilans d'énergie et de matière dans un évaporateur à un effet.....	396
2.2	Les bilans d'énergie et de matière dans un évaporateur à multiples effets.....	400
3.	Facteurs influençant la qualité du produit alimentaire.....	403
4.	Thermocompression et recompression mécanique des vapeurs.....	405
4.1	La thermocompression.....	405
4.2	La recompression mécanique.....	406
	Bibliographie.....	409

Chapitre 15

Le séchage ou la déshydratation des aliments

1.	Transfert de chaleur et procédés de séchage.....	411
1.1	Transfert de chaleur.....	411
1.2	Procédés de séchage.....	411
2.	Les différents appareils de séchage.....	412
2.1	Four à air chaud.....	412
2.2	Sécheur à plateau.....	413
2.3	Tunnel de séchage.....	413
2.4	Sécheur à lit fluidisé.....	414
2.5	Sécheur à atomisation.....	415
2.6	Sécheur à tambour.....	417
2.7	Lyophilisateur.....	418
3.	Séchage des aliments par entraînement d'air.....	420
3.1	Taux de transferts de chaleur et de matière.....	420
3.2	Courbes de séchage.....	421
3.2.1	Séchage à vitesse constante.....	421
3.2.2	Séchage à vitesse décroissante.....	426

3.3	Bilan de matière et d'énergie dans un sécheur à entraînement d'air	435
3.3.1	Bilan de matière	436
3.3.2	Bilan d'énergie	437
4.	Cas particuliers des aliments liquides : séchage par atomisation	442
4.1	Temps de séchage pendant la période à vitesse constante	442
4.2	Temps de séchage pendant la période à vitesse décroissante	447
5.	Séchage à tambour	451
6.	Séchage par lyophilisation	454
6.1	Transfert contrôlant le séchage par lyophilisation	454
6.2	Détermination des temps de lyophilisation	455
6.3	Détermination des temps de lyophilisation pour des produits granulaires	458
7.	Influence des paramètres de séchage sur le produit déshydraté	459
	Bibliographie	460

Chapitre 16

Débaactérisation, concentration et purification par procédés baromembranaires

L. Bazinet, L. Firdaous et Y. Pouliot

1.	Introduction	461
2.	Procédés baromembranaires	462
2.1	Définition	462
2.2	Les membranes	463
2.2.1	Matériaux membranaires	463
2.2.2	Configurations membranaires	466
2.3	Modes opératoires	468
2.3.1	Boucles de filtration	468
2.3.2	Suivi de la filtration et facteur de concentration volumique (FCV)	469
2.3.3	Filtration en discontinu et en continu	470
2.3.4	La diafiltration	472
3.	Applications à la conservation des aliments	473
3.1	Lait et lactosérum	473
3.1.1	Production de lait longue conservation (Procédé Bacto-catch TM)	474
3.1.2	Épuration des laits de fromagerie	476
3.1.3	Épuration du lactosérum	476
3.1.4	Purification des saumures de fromagerie	477
3.2	Jus de fruits et de légumes	477
3.2.1	Clarification du jus de pomme	477
3.2.2	Stérilisation à froid des jus	479
3.2.3	Concentration des jus	480
3.3	Bière	480
3.3.1	Séparation de la maïsche	481
3.3.2	Clarification de la bière brute pour assurer sa stabilité colloïdale	481
3.3.3	Stérilisation à froid de la bière pour assurer sa stabilité microbiologique	483
3.4	Huiles	483
3.4.1	Huile d'olive extra vierge	483
3.4.2	Huile raffinée	485
4.	Éléments de théorie et paramètres opératoires	486
4.1	Sélectivité des membranes de filtration	487
4.1.1	Définition	487
4.1.2	Coefficient de rejet et transmission des solutés	489
4.2	Le flux de perméation (J)	493

4.3	Effet des paramètres opératoires.....	495
4.3.1	Pression transmembranaire	495
4.3.2	Propriétés des fluides à traiter	499
4.4	Rendements en séparation membranaire	500
5.	Transport membranaire.....	501
5.1	Rappels et définitions	501
5.1.1	Potentiel chimique	501
5.1.2	Pression osmotique	502
5.2	Mécanismes de rétention	505
5.2.1	Rétention stérique	505
5.2.2	Rétention chimique	506
5.2.3	Rétention électrique	506
5.3	Équations de transport membranaire	507
5.3.1	Thermodynamique irréversible	508
5.3.2	Modèle de solution-diffusion	509
5.3.3	Modèle capillaire	515
6.	Polarisation de concentration et colmatage.....	516
6.1	Polarisation de concentration.....	517
6.1.1	Description du phénomène.....	517
6.1.2	Modélisation de la polarisation : théorie du film.....	518
6.1.3	Coefficient de transfert de matière	521
6.2	Colmatage	523
	Conclusion	525
	Bibliographie	526

Chapitre 17

Déminéralisation, enrichissement et stabilisation par procédés électromembranaires

L. Bazinet

1.	Introduction	527
2.	L'électrodialyse	528
2.1	Définition	528
2.2	L'électrodialyseur ou module d'ÉD	528
2.3	Les membranes d'électrodialyse	532
2.3.1	Les membranes monopolaires.....	532
2.3.2	Les membranes bipolaires.....	533
2.3.3	Les membranes de filtration.....	535
3.	Applications de l'ÉD pour la conservation des aliments.....	536
3.1	Stabilisation tartrique des vins par ED avec membranes monopolaires.....	537
3.2	Inhibition du brunissement enzymatique du jus de pomme frais opalescent par ED avec membranes bipolaires.....	539
3.3	Enrichissement en polyphénols naturels d'un jus de canneberges par ED avec membranes de filtration.....	542
4.	Éléments de théorie électrochimique	544
4.1	Quantité d'électricité	544
4.2	Équivalent masse transporté	546
4.3	Flux molaire	547
4.4	Nombre de transport.....	549
5.	Phénomène de transport.....	550
5.1	Transfert de masse.....	551

5.2	Gradients de concentration et concentration de polarisation	555
5.2.1	Les gradients de concentration	555
5.2.2	La polarisation de concentration	558
5.3	La densité de courant limite	559
5.3.1	Calcul de la densité de courant limite	559
5.3.2	Détermination de la densité de courant limite	561
6.	Coefficient d'efficacité du courant, consommation électrique et nombre de protons électrogénérés.....	564
6.1	Coefficient d'efficacité du courant	564
6.2	Calcul de la consommation électrique	566
6.3	Calcul du nombre de protons ou d'hydroxyles électrogénérés par membrane bipolaire.....	566
	Conclusion	568
	Bibliographie	568
	Annexes	569
	Index	571

Introduction

La diversité des produits alimentaires présents sur les étagères des supermarchés ne surprend pas les consommateurs qui se sont habitués à voir de plus en plus d'aliments fabriqués à l'aide de procédés très différents. En effet, au fur et à mesure que les connaissances augmentent dans les domaines de la microbiologie, de la chimie, du génie et de l'emballage, l'industrie alimentaire met sur le marché des produits de plus en plus nombreux dont la qualité s'améliore constamment.

Il faut reconnaître que l'aliment est un système complexe. Les réactions de détérioration sont intrinsèques ou extrinsèques à l'aliment. Les réactions intrinsèques impliquent les éléments qui composent l'aliment : les protéines (putréfaction), les glucides (fermentation), les lipides (oxydation), les enzymes, les minéraux, les vitamines, les saveurs, les pigments et l'eau. Les réactions extrinsèques impliquent des facteurs non compris dans les aliments : les microorganismes et leurs enzymes, l'oxygène, la lumière, l'humidité, la température d'entreposage. Les détériorations des aliments deviennent compliquées dans la mesure où toutes ces réactions se produisent en même temps, à un rythme différent. Quand on parle de la conservation des aliments, il faut déterminer lesquels de ces facteurs ou de ces réactions sont susceptibles de détériorer l'aliment en premier. Une fois ces facteurs de détérioration de l'aliment identifiés, il faut déterminer les moyens nécessaires pour prolonger la durée de vie de l'aliment.

Les premières opérations liées à la conservation des aliments et qui se rencontrent dans presque toutes les usines alimentaires sont le chauffage et le refroidissement. Il est rare que dans une usine alimentaire, le produit ne soit pas chauffé ou refroidi à un moment ou à un autre. C'est pour cela qu'il est essentiel de bien comprendre ce qu'est le chauffage et le refroidissement. Ceci implique la bonne connaissance des transferts de chaleur et des équipements utilisés pour chauffer ou refroidir, tels que les échangeurs de chaleur. D'autre part, nous introduirons les notions de transferts de masse qui interviennent dans différentes opérations telles que le séchage, la filtration

membranaire et l'électrodialyse. Nous allons donc voir en détail :

- la réfrigération, parce qu'elle est très importante pour tous les produits frais ;
- la congélation, à cause de sa popularité auprès des consommateurs et parce qu'elle implique à la fois un refroidissement et un changement de phase (eau → glace), ce qui a une influence sur la qualité de l'aliment ;
- la concentration, qui est une opération largement utilisée dans l'industrie laitière ;
- le séchage, à cause de son importance dans l'industrie alimentaire en général et dans l'industrie laitière en particulier ;
- la stérilisation des conserves et la pasteurisation, parce que dans le monde entier cette industrie est largement répandue ;
- les procédés de filtration baromembranaires (UF, MF, NF, OI) qui sont maintenant couramment utilisés en industrie pour séparer ou concentrer ;
- les procédés électromembranaires, des technologies en pleine expansion dans l'industrie agroalimentaire et des nutraceutiques.

Dans ce livre, nous traiterons des technologies ou opérations unitaires traditionnelles en industrie agroalimentaire (pasteurisation, concentration, etc.) mais aussi des technologies de séparation qui sont appelées à se développer (séparation électromembranaire) ou en plein développement (séparation baromembranaire). En effet, avec le développement des nutraceutiques et des aliments fonctionnels, l'industrie alimentaire recherche de nouvelles technologies ou opérations unitaires lui permettant de tirer parti de ce marché en plein développement. Les techniques membranaires font partie de ces technologies qui démontrent un potentiel énorme pour la production de molécules bioactives ou la fabrication d'aliments fonctionnels. Dans ce sens, nous avons choisi de détailler dans leur chapitre respectif les applications actuelles et potentielles des technologies de séparation membranaire.

Afin de présenter l'ensemble de ces opérations unitaires mises en jeu dans la conservation des aliments au sein d'une entreprise alimentaire et pour faciliter la lecture et la compréhension de cet ouvrage, nous avons séparé les chapitres en deux parties. La première partie porte sur les principes de conservation et les notions préliminaires fondamentales (ex. : activité de l'eau, propriétés thermophysiques des aliments, transfert de chaleur, etc.). Ces principes et notions sont nécessaires à la compréhension des chapitres contenus dans la seconde partie portant sur les opérations unitaires et les procédés appliqués à la conservation des aliments. D'un point de vue pédagogique, comme ce livre s'adresse tout autant à des étudiants, à des

universitaires, ou encore à des industriels de la transformation alimentaire, de nombreux exemples de calcul ainsi que d'applications concrètes seront présentés. Le but de cet ouvrage n'est pas de refaire la théorie, qui a déjà été traitée dans de nombreux livres, mais de donner un outil pratique aux personnes travaillant ou se destinant à travailler dans les industries agroalimentaires et désirant faire des calculs appliqués. Ce livre deviendra donc pour eux un instrument important pour régler une grande partie des problèmes quotidiens.

Enfin, du matériel complémentaire est disponible sur le site internet du livre à l'adresse suivante : <http://www.LaurentBazinet.fsaa.ulaval.ca/Livre-Concepts-GA.html>. Sur ce site vous trouverez la liste des références complètes de chacun des chapitres, des liens avec des sites d'équipementiers, des démonstrations de certaines démarches théoriques de calcul, des photos couleurs, des animations ainsi que de nombreux exercices et problèmes supplémentaires avec leurs corrigés pour chacun des chapitres. De plus, ce site permettra de rendre ce livre plus attractif et de maintenir le matériel didactique continuellement à jour. Pour accéder à ces informations privilégiées vous devrez vous authentifier en utilisant l'identifiant « **Concepts-GA** » et le mot de passe « **Exercices2011** ».

Laurent Bazinet est ingénieur et professeur titulaire à l'Université Laval (Québec, Canada). Il enseigne actuellement le génie des procédés et la transformation alimentaire au département de sciences des aliments et de nutrition. Ses intérêts de recherche portent sur l'étude des phénomènes électrodialytiques et leurs impacts sur les composés bio-alimentaires. En 15 ans de carrière, il a déjà publié plus de 90 articles scientifiques dans des revues internationales et donné plus de 170 communications scientifiques.

François Castaigne est ingénieur et professeur émérite à l'Université Laval (Québec, Canada). Il a enseigné pendant 35 ans les procédés unitaires et la conservation des aliments. Tout au long de sa carrière scientifique, il a mené à bien un vaste programme de recherche en génie alimentaire et conservation des aliments. Il a contribué à la formation de 48 étudiants à la maîtrise et au doctorat. Durant sa carrière il a publié 110 articles scientifiques dans des revues internationales, 10 chapitres de livres et 9 brevets.

Avec le développement des nutraceutiques et des aliments fonctionnels, les aliments deviennent des systèmes de plus en plus complexes, soumis à de nombreuses réactions de détérioration. Afin de tirer parti de ce marché en plein développement, l'industrie alimentaire recherche de nouvelles technologies ou opérations unitaires lui permettant de mieux répondre aux besoins des consommateurs, notamment en termes de délais et de qualité de conservation des aliments.

Dans ce contexte de mutation de l'industrie agroalimentaire, **Concepts de génie alimentaire** présente de manière détaillée l'ensemble des procédés mis en jeu dans la conservation des aliments.

Dans une première partie, l'ouvrage décrit tous les principes de conservation et les notions préliminaires fondamentales (activité de l'eau, propriétés thermophysiques des aliments, transfert de chaleur...), nécessaires à la maîtrise des opérations unitaires mises en œuvre. Les différents procédés de conservation des aliments sont ensuite analysés dans une deuxième partie à travers l'étude des technologies ou opérations unitaires traditionnelles utilisées en industrie agroalimentaire (pasteurisation, concentration, etc.) et des technologies de séparation qui sont appelées à se développer (séparation électromembranaire) ou en plein développement (séparation baromembranaire).

Avec une approche orientée vers la résolution de cas concrets, cet ouvrage permet d'effectuer de nombreux calculs pratiques et par conséquent de résoudre une grande partie des problèmes quotidiens rencontrés en milieu industriel.

Concepts de génie alimentaire s'adresse à tous les professionnels de l'industrie de la transformation alimentaire. Il constitue un outil pratique pour les personnes travaillant ou se destinant à travailler dans les industries agroalimentaires ou chimiques, et désirant faire des calculs appliqués. Il sera également utile à tous les étudiants, enseignants et chercheurs dans les domaines de la transformation alimentaire et du génie des procédés.



978-2-7430-1393-6