

# Table des matières

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

## Première partie

### Principes de conservation et notions préliminaires de génie alimentaire

#### Chapitre 1

##### Activité de l'eau

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.....	29

#### 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.....	34
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.....	54
5.1 Cinétique de réaction.....	54
5.2 La valeur Z .....	55
Conclusion .....	59
Bibliographie .....	59

### Chapitre 3

#### Fluides et écoulements

1. Types d'écoulement des fluides.....	61
1.1 Définition .....	61
1.2 Écoulement newtonien .....	62
1.3 Écoulement non newtonien .....	62
1.4 Écoulements plastique et quasiplastique.....	63
2. Viscosimétrie .....	66
3. Écoulement des fluides newtoniens et non newtoniens .....	70
3.1 Écoulement des fluides newtoniens.....	70
3.2 Écoulement des fluides non newtoniens.....	73
Bibliographie .....	75

### Chapitre 4

#### Propriétés thermophysiques

L. Bazinet, P. Schuck et F. Castaigne

1. La chaleur .....	77
1.1 La chaleur massique $C_p$ .....	77
1.1.1 Au-dessus du point de congélation de l'aliment.....	78
1.1.2 En dessous du point de congélation de l'aliment .....	82
1.2 La chaleur latente $C_L$ .....	84
2. Masse volumique ( $\rho$ ).....	85
2.1 Si on ne connaît que la teneur en eau .....	85
2.2 Si on connaît la composition de l'aliment .....	85
2.2.1 Au-dessus du point de congélation de l'aliment.....	85
2.2.2 En dessous du point de congélation de l'aliment .....	86
3. Conductivité thermique (K).....	87
3.1 Au-dessus du point de congélation de l'aliment.....	88
3.1.1 Si on ne connaît que le pourcentage d'eau .....	88
3.1.2 Si on connaît le pourcentage d'eau et la température .....	89
3.1.3 Si on connaît la composition de l'aliment et la température (T) .....	89

3.2	En dessous du point de congélation de l'aliment.....	89
3.2.1	Si on connaît le pourcentage d'eau W.....	89
3.2.2	Si on connaît la température de congélation commençante ou de changement d'état ( $T_c$ ) et la température du produit congelé ( $T$ ).....	90
4.	Diffusivité thermique ( $\alpha$ ).....	91
4.1	Au-dessus du point de congélation de l'aliment.....	92
4.1.1	Si on connaît le pourcentage d'eau.....	92
4.1.2	Si on connaît le pourcentage d'eau ( $W$ ), le pourcentage de gras ( $F$ ) et la température ( $T$ ).....	92
4.2.	En dessous du point de congélation de l'aliment.....	93
5.	Transition vitreuse et température de transition vitreuse.....	93
5.1	Transition vitreuse.....	93
5.2.	Température de transition vitreuse ( $T_g$ ).....	94
	Bibliographie.....	97

## Chapitre 5

### Bilans de matière et d'énergie

1.	Les bilans de matière.....	99
1.1	Principe du bilan de matière.....	99
1.1.1	Définitions générales et base de calcul.....	99
1.1.2	Bilan de matière global.....	101
1.1.3	Bilan de matière sur les composants.....	102
1.2	Bilan de matière relatif à la dilution, la concentration et la déshydratation.....	104
1.2.1	Dilution.....	104
1.2.2	Concentration.....	105
1.2.3	Séchage.....	105
1.3	Bilan de matière dans les mélanges de produits.....	106
2.	Énergie et bilan d'énergie.....	109
2.1	Définitions.....	109
2.1.1	La chaleur.....	109
2.1.2	Énergie consommée pour produire de la chaleur.....	109
2.2	Vapeur saturante et utilisation des tables de vapeur saturante.....	111
2.3	Bilans d'énergie.....	116
	Bibliographie.....	118

## Chapitre 6

### Transfert de chaleur

1.	Les transferts de chaleur.....	119
2.	Les modes de transfert de chaleur.....	120
2.1	Transfert de chaleur par conduction.....	120
2.1.1	Définition.....	120
2.1.2	Taux de transfert de chaleur par conduction.....	121
2.2	Transfert de chaleur par convection.....	123
2.2.1	Définition.....	123
2.2.2	Taux de transfert de chaleur par convection.....	124
2.3	Transfert de chaleur par radiation.....	124
2.3.1	Définition.....	124
2.3.2	Taux de transfert de chaleur par radiation.....	125
3.	Transferts de chaleur stationnaires.....	125
3.1	Transfert par conduction dans un corps solide : cas général.....	125
3.2	Transfert de chaleur par conduction à travers des couches successives.....	127

3.3	Transfert par conduction à travers la paroi d'un tuyau .....	130
3.4	Transfert par conduction à travers la paroi d'un tuyau multicouche.....	132
3.5	Cas de transferts de chaleur combinés (conduction-convection) à travers une paroi entourée de deux fluides.....	133
3.6	Cas de transferts de chaleur combinés (convection-conduction) à travers la paroi d'un tuyau .....	136
3.7	Détermination des coefficients de transfert de chaleur par convection h.....	140
3.7.1	Invariants de similitude.....	140
3.7.2	Équations permettant de calculer le coefficient de transfert de chaleur par convection h.....	143
3.8	Corps chauffé par une source radiante : cas général .....	149
3.9	Taux de transfert par radiation entre deux objets.....	151
3.9.1	Transfert de chaleur par radiation et facteur de forme .....	151
3.9.2	Évaluation du facteur de forme .....	152
4.	Transferts de chaleur non stationnaires.....	158
4.1	Chauffage et refroidissement de produits alimentaires solides .....	159
4.1.1	Transferts de chaleur et résistances thermiques associées.....	159
4.1.2	Approche expérimentale de la cinétique de variation de la température dans l'aliment.....	161
4.1.3	Relation entre la cinétique de variation de la température expérimentale et théorique.....	163
4.1.4	Transfert de chaleur non stationnaire dans des solides ayant la forme d'un parallélépipède rectangle et d'un cylindre fini .....	166
4.2	Chauffage et refroidissement de produits alimentaires liquides .....	170
	Bibliographie .....	172
	Annexes .....	174

## Chapitre 7

### Notions générales sur les mélanges air-vapeur d'eau

1.	Humidité relative .....	177
2.	Mélange air-vapeur d'eau .....	178
3.	Température du thermomètre humide $T_h$ .....	179
4.	Enthalpie de l'air humide.....	184
5.	Utilisation du diagramme enthalpique de l'air humide ou diagramme psychrométrique.....	185
5.1	Diagramme enthalpique.....	185
5.2	Détermination de la température de rosée $T_r$ .....	188
5.3	Détermination de la température du thermomètre humide $T_h$ .....	189
5.4	Détermination de la teneur en eau de l'air lors du chauffage de l'air .....	190
5.5	Détermination de l'enthalpie de l'air.....	191
6.	Détermination des caractéristiques d'un mélange d'air .....	192
7.	Cas du séchage par entraînement d'air : méthode approchée.....	194
7.1	Bilan de matière .....	194
7.2	Bilan d'énergie .....	194
	Bibliographie .....	197

## Chapitre 8

### Transfert de masse

1.	Les transferts de masse .....	199
2.	Les modes de transfert de masse.....	200
2.1	Transfert de masse par diffusion .....	201
2.1.1	Définition.....	201
2.1.2	Taux de transfert de masse par diffusion.....	201

2.2	Transfert de masse par convection .....	204
2.2.1	Définition .....	204
2.2.2	Taux de transfert de masse par convection.....	205
2.3	Transfert de masse par migration .....	206
2.3.1	Définition .....	206
2.3.2	Taux de transfert de masse par migration .....	207
3.	Transferts de masse stationnaires.....	208
3.1	Transfert de masse par diffusion dans un corps : cas général .....	208
3.1.1	Cas des liquides .....	208
3.1.2	Cas des gaz.....	210
3.2	Transfert de masse par diffusion à travers des couches successives .....	215
3.2.1	Cas des liquides .....	216
3.2.2	Cas des gaz.....	217
3.3	Transfert de masse par diffusion dans un cylindre .....	219
3.3.1	Cas des liquides .....	219
3.3.2	Cas des gaz.....	222
3.4	Cas de transferts de masse combinés (diffusion-convection) à travers une paroi plane .....	223
3.4.1	Cas des liquides .....	223
3.4.2	Cas des gaz.....	225
3.5	Cas de transferts de masse combinés (diffusion-convection) à travers la paroi d'un tuyau .....	226
4.	Estimation des coefficients de transferts de masse par convection .....	228
4.1	Invariants de similitude .....	229
4.1.1	Le nombre de Reynolds : $N_{Re}$ .....	229
4.1.2	Le nombre de Sherwood : $N_{Sh}$ .....	229
4.1.3	Le nombre de Schmidt : $N_{Sc}$ .....	229
4.1.4	Le nombre de Lewis : $N_{Le}$ .....	230
4.1.5	Le nombre de Biot : $N_{Bi}$ .....	230
4.2.	Équations permettant de calculer le coefficient de transfert de masse par convection.....	231
4.2.1	Cas d'un fluide s'écoulant dans un tuyau.....	231
4.2.2	Cas d'un fluide s'écoulant parallèlement à une paroi plane .....	231
4.2.3	Cas d'un fluide s'écoulant autour d'une sphère .....	232
4.2.4	Cas d'une cuve munie d'un agitateur .....	233
5.	Transferts de masse non stationnaires.....	233
5.1	Diffusion transitoire .....	234
5.2	Diffusion des gaz.....	237
	Bibliographie .....	239

## Seconde partie

### Opérations unitaires et procédés

#### Chapitre 9

#### Échangeurs de chaleur

1.	Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur.....	243
1.1	Fonctionnement d'un échangeur de chaleur .....	243
1.2	Profil de température .....	245
2.	Différents types d'échangeurs de chaleur .....	245
2.1	Les échangeurs de chaleur à plaques .....	245
2.1.1	Généralités .....	245
2.1.2	Modes de fonctionnement.....	246
2.1.3	Configurations .....	246
2.1.4	Autres paramètres importants des échangeurs de chaleur à plaques .....	248

2.2	Les échangeurs de chaleur à spirale.....	249
2.3	Les échangeurs de chaleur à surface raclée .....	249
2.4	Les échangeurs de chaleur tubulaires .....	250
2.5	Les échangeurs de chaleur par infusion vapeur .....	251
3.	Transfert de chaleur et évaluation de la taille .....	252
3.1	Coefficient de transfert de chaleur global.....	252
3.2	Paramètres impliqués dans l'évaluation de la taille d'un échangeur de chaleur .....	253
3.3	Récupération de chaleur .....	258
3.3.1	Conceptualisation d'un échangeur à plaque avec section de récupération .....	258
3.3.2	Calcul du taux de récupération.....	259
	Bibliographie .....	262

## Chapitre 10

### Le blanchiment

1.	Buts du blanchiment et effets sur l'aliment.....	263
1.1	L'inactivation des enzymes .....	263
1.2	Autres fonctions du blanchiment .....	264
1.3	Les inconvénients du blanchiment.....	264
2.	Les procédés de blanchiment .....	265
2.1	Les blanchiments à eau.....	265
2.2	Les blanchiments à vapeur .....	267
3.	Durée et température de blanchiment .....	268
3.1	Les transferts de chaleur.....	268
3.2	Résistance au transfert de chaleur.....	269
	Bibliographie .....	273

## Chapitre 11

### Pasteurisation et stérilisation

1.	La pasteurisation.....	275
1.1	But de la pasteurisation, applications et effets sur l'aliment.....	275
1.1.1	Destruction des microorganismes et barèmes de pasteurisation.....	275
1.1.2	Applications .....	276
1.1.3	Les effets sur les aliments .....	276
1.2	Les procédés de pasteurisation .....	277
1.3	Durée et température de pasteurisation.....	278
1.3.1	Les calculs reliés à la pasteurisation des aliments liquides .....	278
1.3.2	Les calculs reliés à la pasteurisation des aliments solides .....	281
2.	La stérilisation des aliments.....	283
2.1	But de la stérilisation et effet sur l'aliment.....	283
2.1.1	La destruction des microorganismes .....	283
2.1.2	Les effets sur les aliments .....	283
2.2	Les procédés de stérilisation.....	285
2.2.1	Les autoclaves discontinus.....	285
2.2.2	Les autoclaves continus .....	290
2.3	Barème de stérilisation .....	294
2.3.1	La valeur stérilisatrice.....	295
2.3.2	Étude de la pénétration de la chaleur dans une boîte de conserve .....	301
2.3.3	Calcul de la valeur létale d'un traitement thermique.....	311
2.3.4	Changement dans les conditions de stérilisation.....	324
2.3.5	Refroidissement des boîtes de conserves .....	328
2.3.6	Méthode d'ajustement des barèmes de stérilisation .....	331

2.4	Stérilisation d'aliments faiblement acides dans les procédés continus à remplissage aseptique .....	331
2.4.1	Détermination du temps de stérilisation dans le cas des produits liquides .....	331
2.4.2	Détermination du temps de stérilisation dans le cas des produits liquides contenant des morceaux solides .....	333
3.	Autres technologies de pasteurisation-stérilisation .....	338
3.1	Champs électriques pulsés à hauts voltage .....	338
3.1.1	Principe .....	338
3.1.2	Appareillage et paramètres de fonctionnement .....	339
3.1.3	Applications en alimentaire et mécanismes d'action .....	340
3.1.4	Avantages et inconvénients .....	342
3.2	Lumière pulsée .....	343
3.2.1	Principe .....	343
3.2.2	Appareillage et paramètres de fonctionnement .....	343
3.2.3	Applications en alimentaire et mécanismes d'action .....	344
3.2.4	Avantages et inconvénients .....	345
3.3	Hautes pressions hydrostatiques .....	346
3.3.1	Principe .....	346
3.3.2	Appareillage et paramètres de fonctionnement .....	347
3.3.3	Applications en alimentaire et mécanismes d'action .....	348
3.3.4	Avantages et inconvénients .....	350
	Conclusion .....	350
	Bibliographie .....	351

## Chapitre 12

### La réfrigération et l'entreposage réfrigéré

1.	Introduction .....	353
2.	Refroidissement des viandes .....	353
2.1	Morphologie du muscle .....	353
2.2	Rigidité cadavérique et maturation .....	354
2.3	Réfrigération des viandes .....	356
3.	Entreposage des fruits et légumes .....	359
3.1	Refroidissement et entreposage réfrigéré .....	359
3.2	Entreposage sous atmosphère contrôlée ou modifiée .....	362
4.	Besoins frigorifiques .....	363
4.1	Pertes d'énergie à travers les parois de l'entrepôt .....	364
4.2	Pertes d'énergie à travers les fissures .....	366
4.3	Pertes d'énergie par renouvellement d'air .....	366
4.4	Pertes d'énergie par les portes .....	367
4.5	Perte d'énergie par production de chaleur à l'intérieur de l'entrepôt .....	368
4.6	Pertes d'énergie dues à la respiration des fruits et légumes .....	368
4.7	Évaluation de la quantité d'énergie à retirer du produit pour baisser sa température à celle de l'entrepôt .....	371
4.8	Puissance de l'installation frigorifique .....	372
	Bibliographie .....	374

## Chapitre 13

### Congélation et décongélation

1.	Introduction .....	375
2.	Formation des cristaux de glace .....	375
2.1	Nucléation et taille des cristaux .....	375

2.2	Recristallisation .....	376
3.	Effet de la congélation sur l'aliment .....	377
3.1	Diagramme de phases de l'eau et eutectique .....	377
3.2	Effet sur l'eau non congelée .....	381
3.3	Effet sur la structure cellulaire .....	381
3.4	Détérioration de l'aliment pendant la congélation et l'entreposage à l'état congelé .....	382
4.	Procédés de congélation .....	383
4.1	Congélateurs où la production de froid est mécanique .....	383
4.1.1	Congélateurs à air .....	383
4.1.2	Congélateur par immersion .....	384
4.1.3	Les congélateurs par contact avec une surface froide .....	385
4.2	Congélation cryogénique .....	388
5.	Thermodynamique de la congélation .....	390
5.1	Température de congélation commençante $T_e$ .....	391
5.2	Pourcentage d'eau congelée .....	393
5.3	Variation de l'enthalpie durant la congélation .....	394
6.	Évaluation des temps de congélation .....	396
6.1	Méthode de Plank .....	397
6.2	Méthode de Plank modifiée .....	402
6.2.1	Évaluation de $t_f$ .....	402
6.2.2	Évaluation de $t_c$ .....	403
6.2.3	Évaluation de $t_e$ .....	407
7.	Vitesse de congélation .....	410
8.	Évolution de la qualité au cours de l'entreposage .....	411
9.	Décongélation .....	416
9.1	Méthodes de décongélation .....	416
9.2	Calcul du temps de décongélation .....	417
9.2.1	Phases de décongélation .....	417
9.2.2	Évaluation de $t_{rec}$ .....	419
9.2.3	Évaluation de $t_{fd}$ .....	420
9.2.4	Évaluation de $t_e$ .....	421
	Bibliographie .....	425

## Chapitre 14

### Concentration par évaporation

1.	Principe et types d'évaporateurs .....	427
1.1	Principe .....	427
1.2	Les différents types d'évaporateurs .....	428
1.2.1	Évaporateur à flot grim pant .....	429
1.2.2	Évaporateurs à flot descendant .....	430
1.2.3	Évaporateurs spiralés .....	430
1.2.4	Évaporateur à plaques .....	431
1.2.5	Évaporateurs à surface raclée .....	431
1.2.6	Évaporateur à cône(s) rotatif(s) .....	432
2.	Bilans d'énergie et de matière .....	433
2.1	Les bilans d'énergie et de matière dans un évaporateur à un effet .....	433
2.2	Les bilans d'énergie et de matière dans un évaporateur à multiples effets .....	438
3.	Facteurs influençant la qualité du produit alimentaire .....	441
4.	Thermocompression et recompression mécanique des vapeurs .....	442
4.1	La thermocompression .....	442
4.2	La recompression mécanique .....	444
	Bibliographie .....	446



## Chapitre 15

### Séchage ou déshydratation

L. Bazinet, P. Schuck et F. Castaigne

1. Transfert de chaleur et procédés de séchage .....	449
1.1 Transfert de chaleur .....	449
1.2 Procédés de séchage .....	449
2. Les différents appareils de séchage .....	450
2.1 Four à air chaud .....	450
2.2 Sécheur à plateau .....	451
2.3 Tunnel de séchage .....	451
2.4 Sécheur à lit fluidisé .....	452
2.5 Sécheur à atomisation .....	453
2.6 Sécheur à tambour .....	455
2.7 Lyophilisateur .....	456
2.8 Zéodratation .....	458
2.9 Séchage par détente instantanée contrôlée .....	460
2.10 Séchage par énergie radiante sous vide .....	462
2.11 Technologie d'extrusion-porosification .....	463
2.12 Sécheur Evolum® rotante .....	464
2.13 Technologie « poudre sans tour » .....	465
3. Séchage des aliments par entraînement d'air .....	467
3.1 Taux de transferts de chaleur et de matière .....	467
3.2 Courbes de séchage .....	467
3.2.1 Séchage à vitesse constante .....	468
3.2.2 Séchage à vitesse décroissante .....	473
3.3 Bilan de matière et d'énergie dans un sécheur à entraînement d'air .....	482
3.3.1 Bilan de matière .....	483
3.3.2 Bilan d'énergie .....	484
4. Cas particuliers des aliments liquides : séchage par atomisation .....	489
4.1 Temps de séchage pendant la période à vitesse constante .....	489
4.2 Temps de séchage pendant la période à vitesse décroissante .....	494
5. Séchage à tambour .....	498
6. Séchage par lyophilisation .....	501
6.1 Transfert contrôlant le séchage par lyophilisation .....	501
6.2 Détermination des temps de lyophilisation .....	503
6.3 Détermination des temps de lyophilisation pour des produits granulaires .....	506
7. Influence des paramètres de séchage sur le produit déshydraté .....	507
Bibliographie .....	508

## Chapitre 16

### Débaçtérisation, concentration et purification par procédés baromembranaires

L. Bazinet, L. Firdaous et Y. Pouliot

1. Introduction .....	509
2. Procédés baromembranaires .....	510
2.1 Définition .....	510
2.2 Les membranes .....	511
2.2.1 Matériaux membranaires .....	511
2.2.2 Configurations membranaires .....	514

2.3	Modes opératoires .....	516
2.3.1	Boucles de filtration .....	516
2.3.2	Suivi de la filtration : facteur de concentration volumique et taux de conversion .....	517
2.3.3	Filtration en discontinu et en continu .....	519
2.3.4	La diafiltration .....	520
3.	Applications alimentaires .....	522
3.1	Lait et lactosérum .....	522
3.1.1	Production de lait longue conservation (Procédé Bacto-catch <sup>TM</sup> ) .....	522
3.1.2	Épuration des laits de fromagerie .....	524
3.1.3	Épuration du lactosérum .....	525
3.1.4	Purification des saumures de fromagerie .....	525
3.1.5	Préconcentration et production d'eau de procédé .....	526
3.2	Jus de fruits et de légumes .....	529
3.2.1	Clarification du jus de pomme .....	529
3.2.2	Stérilisation à froid des jus .....	531
3.2.3	Concentration des jus .....	532
3.3	Bière .....	532
3.3.1	Séparation de la maïsche .....	532
3.3.2	Clarification de la bière brute pour assurer sa stabilité colloïdale .....	534
3.3.3	Stérilisation à froid de la bière pour assurer sa stabilité microbiologique .....	534
3.4	Huiles .....	535
3.4.1	Huile d'olive extra vierge .....	535
3.4.2	Huile raffinée .....	535
4.	Éléments de théorie et paramètres opératoires .....	538
4.1	Sélectivité des membranes de filtration .....	538
4.1.1	Définition .....	538
4.1.2	Coefficient de rejet et transmission des solutés .....	540
4.2	Le flux de perméation (J) .....	545
4.3	Effet des paramètres opératoires .....	546
4.3.1	Pression transmembranaire .....	546
4.3.2	Propriétés des fluides à traiter .....	550
4.4	Rendements en séparation membranaire .....	551
5.	Transport membranaire .....	553
5.1	Rappels et définitions .....	553
5.1.1	Potentiel chimique .....	553
5.1.2	Pression osmotique .....	553
5.2	Mécanismes de rétention .....	557
5.2.1	Rétention stérique .....	557
5.2.2	Rétention chimique .....	558
5.2.3	Rétention électrique .....	558
5.3	Équations de transport membranaire .....	558
5.3.1	Thermodynamique irréversible .....	560
5.3.2	Modèle de solution-diffusion .....	561
5.3.3	Modèle capillaire .....	567
6.	Polarisation de concentration et colmatage .....	568
6.1	Polarisation de concentration .....	569
6.1.1	Description du phénomène .....	569
6.1.2	Modélisation de la polarisation : théorie du film .....	570
6.1.3	Coefficient de transfert de matière .....	573
6.2	Colmatage .....	575
	Conclusion .....	577
	Bibliographie .....	578

## Chapitre 17

### Déminéralisation, enrichissement et stabilisation par procédés électromembranaires

L. Bazinet

1. Introduction .....	579
2. L'électrodialyse .....	580
2.1 Définition .....	580
2.2 L'électrodialyseur ou module d'ÉD .....	580
2.3 Les membranes d'électrodialyse .....	584
2.3.1 Les membranes monopolaires .....	584
2.3.2 Les membranes bipolaires .....	585
2.3.3 Les membranes de filtration .....	587
3. Applications de l'ÉD en agroalimentaire .....	588
3.1 ÉD avec membranes monopolaires .....	589
3.1.1 Stabilisation tartrique des vins .....	589
3.1.2 Réduction de l'acide lactique du lactosérum .....	591
3.2 ÉD avec membranes bipolaires .....	593
3.2.1 Inhibition du brunissement enzymatique du jus de pomme frais opalescent .....	593
3.2.2 Diminution des acides organiques de vins et jus de fruit .....	596
3.3 ÉD avec membranes de filtration .....	598
3.3.1 Enrichissement en polyphénols naturels d'un jus de canneberges .....	598
3.3.2 Séparation de molécules à haute valeur ajoutée .....	600
4. Éléments de théorie électrochimique .....	601
4.1 Quantité d'électricité .....	601
4.2 Équivalent masse transporté .....	603
4.3 Flux molaire .....	604
4.4 Nombre de transport .....	606
5. Phénomène de transport .....	608
5.1 Transfert de masse .....	608
5.2 Gradients de concentration et concentration de polarisation .....	612
5.2.1 Les gradients de concentration .....	612
5.2.2 La polarisation de concentration .....	615
5.3 La densité de courant limite .....	616
5.3.1 Calcul de la densité de courant limite .....	616
5.3.2 Détermination de la densité de courant limite .....	618
5.3.3 Dépassement de la densité de courant limite et apparition de vortex .....	621
6. Coefficient d'efficacité du courant, consommation électrique et nombre de protons électrogénérés .....	624
6.1 Coefficient d'efficacité du courant .....	624
6.2 Calcul de la consommation électrique .....	626
6.3 Calcul du nombre de protons ou d'hydroxyles électrogénérés par membrane bipolaire .....	626
Conclusion .....	628
Bibliographie .....	628
<b>Annexes</b> .....	<b>629</b>
<b>Index</b> .....	<b>631</b>