

Table des matières

Avant-propos	1
Mohamed GHOUL	
Introduction	3
Jean-Marc ENGASSER et Mohamed GHOUL	
Partie 1. Les fondamentaux de l'ingénierie des fermenteurs et des photobioréacteurs	7
Introduction de la partie 1.	9
Jean-Marc ENGASSER et Mohamed GHOUL	
Chapitre 1. Principes de l'ingénierie des fermenteurs	15
Jean-Marc ENGASSER et Mohamed GHOUL	
1.1. Bilans matière	15
1.1.1. Bilans matière initial-final.	16
1.1.2. Bilans matière instantanés.	18
1.2. Bilans chaleur	21
1.2.1. Vitesse de production de chaleur dans les fermenteurs	22
1.2.2. Vitesses d'entrée et de sortie de chaleur dans l'air	23
1.2.3. Vitesse de refroidissement d'un fermenteur	24
1.2.4. Bilan chaleur sur un fermenteur	25
1.2.5. Exemple : bilan instantané chaleur sur un fermenteur aéré.	26
1.3. Cinétique microbienne	28
1.3.1. Stœchiométrie des réactions microbiennes	28

1.3.2. Vitesses de fermentation	31
1.3.3. Lois cinétiques microbiennes	38
1.4. Consommation, solubilité et transfert d'oxygène dans les fermenteurs	49
1.4.1. Vitesses de consommation d'oxygène	50
1.4.2. Solubilité de l'oxygène dans les milieux de fermentation	57
1.4.3. Vitesse de transfert d'oxygène dans un fermenteur	61
1.4.4. Variation de la concentration d'oxygène dissous	67
1.5. Production, solubilité et transfert de CO ₂ dans les fermenteurs	69
1.5.1. Vitesse de production de CO ₂	70
1.5.2. Solubilité et équilibres de dissociation du CO ₂	73
1.5.3. Vitesse de transfert de CO ₂	75
1.5.4. Variation de la concentration de CO ₂ dissous durant une fermentation aérobie	76
1.6. Bibliographie	78

Chapitre 2. Mise en œuvre des fermenteurs : principe et optimisation

79

Mohamed GHOUL et Jean-Marc ENGASSER

2.1. Mise en œuvre optimale de fermenteurs	79
2.1.1. Critères d'optimisation de fermenteurs	80
2.2. Fermentations discontinues (<i>batch</i>).	84
2.2.1. Principe des fermentations en mode discontinu	84
2.2.2. Variables opératoires des fermentations discontinues.	85
2.2.3. Modèles de simulation de fermentations <i>batch</i>	85
2.2.4. Optimisation de la mise en œuvre de fermentations anaérobies.	89
2.2.5. Optimisation de fermentations aérobies	91
2.3. Fermentations continues	97
2.3.1. Principe des fermentations en mode continu	97
2.3.2. Variables opératoires des fermentations continues	99
2.3.3. Modèle de simulation des fermentations continues	100
2.3.4. Dynamique des fermentations continues	102
2.3.5. État stationnaire des fermentations continues	103
2.3.6. Optimisation d'une fermentation anaérobie continue de production de métabolites	109
2.3.7. Optimisation d'une fermentation aérobie en continu	112
2.4. Mise en œuvre optimale des fermentations semi-continues (<i>fed-batch</i>)	115
2.4.1. Principe des fermentations en mode <i>fed-batch</i>	115
2.4.2. Variables opératoires des fermentations <i>fed-batch</i>	117
2.4.3. Modèle de simulation de la fermentation <i>fed-batch</i>	118

2.4.4. Productivité et rendement de conversion du substrat pour la fermentation <i>fed-batch</i>	123
2.4.5. Optimisation d'une fermentation <i>fed-batch</i> pour la production de cellules	124
2.4.6. Optimisation d'une fermentation <i>fed-batch</i> pour la production d'un métabolite	129
2.5. Bibliographie.	135

Chapitre 3. Ingénierie des photobioréacteurs 137

Hatem BEN OUADA, Jihène AMMAR et Mohamed GHOUL

3.1. Présentation des différentes configurations de photobioréacteurs	137
3.1.1. Les systèmes de culture à ciel ouvert	139
3.1.2. Les systèmes fermés : les photobioréacteurs	145
3.2. Conclusion	151
3.3. Bibliographie.	152

Chapitre 4. Hydrodynamique et mélange des bioréacteurs 159

Céline LOUBIÈRE et Eric OLMOS

4.1. Introduction.	159
4.2. Hydrodynamique et mélange macroscopique des bioréacteurs	160
4.2.1. Technologies de mélange des bioréacteurs	160
4.2.2. Champs d'écoulement macroscopiques	165
4.2.3. Quantification des capacités de mélange	167
4.2.4. Mélange liquide-solide.	169
4.2.5. Mélange liquide-gaz	172
4.3. Du macromélange au micromélange	176
4.3.1. Fluctuations et taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	177
4.3.2. Description et calcul des contraintes hydromécaniques.	179
4.3.3. Distribution spatiale des grandeurs hydrodynamiques au sein des cuves agitées	180
4.4. Méthode de caractérisation de mélange d'un bioréacteur.	181
4.4.1. Temps de séjour et temps de mélange	181
4.4.2. Écoulements et champs de vitesse	183
4.4.3. Simulation par mécanique des fluides numérique	185
4.5. Couplage hydrodynamique/cinétique.	187
4.5.1. Modèles cinétiques	188
4.5.2. Problématiques liées au couplage	189
4.5.3. Applications de couplage	190

4.6. Conclusion	191
4.7. Bibliographie	192
Chapitre 5. Extrapolation des bioréacteurs	197
Céline LOUBIÈRE, Eric OLMOS et Mohamed GHOU	
5.1. Introduction	197
5.2. Présentation du concept d'extrapolation des bioréacteurs.	197
5.3. Méthodes d'extrapolation	200
5.3.1. Similitudes géométriques et non géométriques	200
5.3.2. Changement d'échelle en condition non aérée et basé sur l'agitation	202
5.3.3. Changement d'échelle en condition aérée et basé sur l'aération	207
5.3.4. Limites et éléments d'appréciation sur les stratégies d'extrapolation en bioréacteur	212
5.4. Conclusion	212
5.5. Bibliographie	213
Partie 2. Illustration de mise en œuvre des bioréacteurs dans les industries agroalimentaires	215
Introduction de la partie 2.	217
Mohamed GHOU	
Chapitre 6. Production de boissons fermentées : cas de la bière.	219
Franck JOLIBERT et Mohamed GHOU	
6.1. Introduction	219
6.2. Présentation du procédé brassicole	220
6.2.1. Opérations de broyage et de brassage	221
6.2.2. Opérations de filtration et d'ébullition.	222
6.2.3. Opérations <i>whirlpool</i> et de refroidissement.	222
6.2.4. Opérations de fermentation, de garde et de saturation	223
6.3. Les voies de dégradation des substrats	225
6.3.1. Métabolisme du carbone.	225
6.3.2. Métabolisme de l'azote	227
6.3.3. Métabolisme du phosphore	228
6.3.4. Métabolisme du soufre.	228

6.4. Les voies de synthèse de métabolites	228
6.4.1. Synthèse d'alcools supérieurs	228
6.4.2. Synthèse des aldéhydes	229
6.4.3. Synthèse des acides organiques	229
6.4.4. Synthèse des esters	230
6.4.5. Synthèse de dicétones	230
6.4.6. Synthèse de composés soufrés	231
6.5. Effets des facteurs physico-chimiques sur le procédé de production de la bière	232
6.5.1. Effet de la densité	232
6.5.2. Effet de la température	234
6.5.3. Effet de l'acidité	234
6.5.4. Effet du taux d'inoculation	234
6.5.5. Effet de la pression	235
6.5.6. Effet de l'agitation et de la configuration du fermenteur	235
6.5.7. Phénomènes d'inhibition	236
6.5.8. Infection par d'autres microorganismes	237
6.6. Nouvelles tendances du procédé de fermentation de la bière	238
6.6.1. Amélioration des souches de levures	239
6.6.2. Cofermentations	240
6.6.3. Procédés fermentaires	241
6.6.4. Développement des techniques de contrôle rapide	243
6.7. Conclusion	243
6.8. Bibliographie	243

Chapitre 7. Production de biomasse et de bioactifs par les microalgues

247

Hatem BEN OUADA et Jihène AMMAR

7.1. Introduction	247
7.2. La production de biomasse des microalgues	248
7.3. Les principaux bioactifs issus des microalgues	251
7.3.1. Les pigments	251
7.3.2. Les substances polymériques extracellulaires (EPS)	257
7.3.3. Les lipides	259
7.3.4. Les acides gras polyinsaturés (AGPI)	259
7.4. Autres potentiels des microalgues	261
7.5. Conclusion	264
7.6. Bibliographie	264

Chapitre 8. Optimisation économique et environnementale des procédés de fermentation	273
Jean-Marc ENGASSER et Mohamed GHOU	
8.1. Évaluation et optimisation économique des procédés de fermentation	274
8.1.1. Méthodologie de l'évaluation économique des procédés de fermentation	274
8.1.2. Domaines de coût des procédés de fermentation.	276
8.1.3. Analyse des coûts de procédé.	276
8.2. Évaluation et optimisation environnementales des procédés de fermentation	277
8.2.1. Impacts environnementaux de l'analyse de cycle de vie	277
8.2.2. Évaluation des indicateurs d'impacts environnementaux.	278
8.2.3. Analyse et optimisation environnementale de procédés de fermentation	279
8.3. Optimisation du procédé de fermentation d'éthanol	279
8.3.1. Procédés de production d'éthanol	279
8.3.2. Cinétique de la fermentation d'éthanol	282
8.3.3. Mise en œuvre optimale de la fermentation d'éthanol	283
8.3.4. Possibilités d'intensification de la fermentation d'éthanol	287
8.3.5. Optimisation environnementale du procédé de production d'éthanol	288
8.4. Optimisation du procédé de fermentation d'acide glutamique	290
8.4.1. Procédé de production d'acide glutamique	290
8.4.2. Cinétique de la fermentation d'acide glutamique	291
8.4.3. Mise en œuvre optimale de la fermentation de l'acide glutamique	293
8.4.4. Stratégie d'intensification de la fermentation	297
8.4.5. Optimisation environnementale du procédé de fermentation d'acide glutamique	299
8.5. Bibliographie.	300
 Conclusion	 303
Mohamed GHOU	
 Liste des auteurs	 305
 Index	 307