

Table des matières

Avant-propos	9
Chapitre 1. Outils pour la modélisation et la simulation des bioréacteurs	13
1.1. Introduction	13
1.2. Approche génie des procédés	14
1.2.1. Modélisation usuelle	14
1.2.1.1. Équation générale de bilan matière	14
1.2.1.2. Équations de bilans matière partiels	14
1.2.1.3. Analyse critique de la modélisation classique	16
1.2.2. Modélisation polyphasique	18
1.2.2.1. Bilans matière globaux par phase	18
1.2.2.2. Bilans matière partiels par phase	18
1.2.2.3. Mise en œuvre dans le cas de réacteurs idéaux	20
1.2.3. Conclusion sur l'approche génie des procédés	29
1.3. Approche mécanique des fluides polyphasiques	30
1.3.1. Équations eulériennes générales	31
1.3.2. Approche eulérienne ou lagrangienne pour la phase biologique	33
1.3.3. Conclusion sur l'approche MFN	36
Chapitre 2. Mélange et bioréactions	39
2.1. Introduction	39
2.2. Mélange et réactions	40
2.2.1. Position du problème	40
2.2.2. Caractérisation du mélange	43

2.2.2.1. Distribution de concentration.	43
2.2.2.2. Champ de concentration.	44
2.2.2.3. Macromélange et micromélange.	47
2.2.2.4. Illustration expérimentale.	49
2.2.2.5. Vitesse de mélange.	51
2.2.3. Mécanismes du mélange.	53
2.2.4. Temps caractéristiques du mélange.	56
2.2.5. Contribution de l'aération au macromélange.	57
2.2.6. Temps caractéristique de la réaction.	61
2.2.6.1. Définition.	61
2.2.6.2. Cas des réactions biologiques.	62
2.3. Interaction entre mélange et bioréactions.	63
2.3.1. Compétition entre mélange et réaction chimique.	63
2.3.2. Compétition entre mélange et réaction biologique.	65
2.3.3. Approche spatiale de la problématique de micromélange.	68
2.3.3.1. Un peu de catalyse hétérogène.	68
2.3.3.2. Transposition au cas de particules biologiques.	70
2.4. Analyse et modélisation des couplages entre mélange et bioréactions.	72
2.4.1. Lien entre état de ségrégation et calcul de la vitesse apparente d'une réaction biologique simple.	73
2.4.2. Modélisation des bioréacteurs non parfaitement mélangés : approche DTS et état de mélange.	78
2.4.3. Approche basée sur un modèle de mélange.	81
2.4.3.1. Modèle hydrodynamique 1-D.	81
2.4.3.2. Modèle de micromélange.	83
2.4.3.3. Analyse.	84
2.4.3.4. Résultats.	85
2.5. Conclusion.	87

Chapitre 3. Assimilation, transfert, équilibre 91

3.1. Introduction.	91
3.2. Transferts entre phases.	92
3.2.1. Transfert gaz-liquide.	92
3.2.2. Transfert liquide/micro-organismes.	96
3.2.2.1. Diffusion simple.	97
3.2.2.2. Transport facilité.	97
3.2.2.3. Transport actif.	97
3.2.2.4. Des transporteurs fonctionnant en parallèle.	98
3.2.2.5. Des transporteurs capables de moduler leur activité.	99

3.2.3. Synthèse et conclusion	102
3.3. Équilibre ou réponses dynamiques : illustrations expérimentales	103
3.3.1. Réponse dynamique en termes de taux de croissance.	103
3.3.1.1. Évolution du taux de croissance en réponse à une augmentation brutale du débit d'alimentation d'un bioréacteur ouvert fonctionnant en mode continu (CSTR)	103
3.3.1.2. Évolution du taux de croissance en réponse à une augmentation progressive du débit d'alimentation d'un bioréacteur ouvert fonctionnant en mode continu (accélérostat) . .	107
3.3.2. Réponse dynamique de l'assimilation : illustrations expérimentales	110
3.3.3. Réponse dynamique du métabolisme	113
3.4. Modèles d'équilibre, modèles dynamiques	118
3.4.1. Modèle cinétique non structuré : modèle d'équilibre ou modèle à zéro équation.	119
3.4.2. Modèle cinétique structuré	122
3.4.3. Modèle métabolique	125
3.5. Confrontation des modèles aux données expérimentales	128
3.5.1. Réponse d'un chemostat à une augmentation du taux de dilution	128
3.5.1.1. Modèle à zéro équation	128
3.5.1.2. Modèle à une équation.	132
3.6. Problématique du couplage entre un modèle biologique et le modèle hydrodynamique	139
3.6.1. Fermeture du terme de transfert liquide-cellule	139
3.6.1.1. Relation algébrique.	139
3.6.1.2. Expression basée sur le taux de croissance.	140
3.6.1.3. Modèle dynamique d'assimilation.	142
3.6.2. Problématique du transport et du mélange	143
3.7. Conclusion	147

Chapitre 4. Bilans de population pour la biologie 149

4.1. Introduction.	149
4.2. Équation générale de bilan de population	151
4.2.1. Définitions	151
4.2.1.1. Vecteur d'état physiologique	151
4.2.1.2. Fonction densité en nombre	152
4.2.1.3. Valeur moyenne	153
4.2.1.4. Établissement de l'équation de base.	155

4.2.2. Quels liens entre les modèles structurés et les bilans de population ?	159
4.2.2.1. Démonstration	160
4.2.2.2. Conditions d'équivalence	162
4.3. Quelques exemples éclairants	163
4.3.1. Modèles basés sur une discrimination selon la masse.	163
4.3.1.1. Résolution	165
4.3.1.2. Résultats marquants	165
4.3.1.3. Limites de l'approche basée sur la masse	169
4.3.2. Discrimination selon l'âge.	174
4.3.2.1. Mise en équation	174
4.3.2.2. Résolution	176
4.3.2.3. Résultats	177
4.3.2.4. Détermination expérimentale des noyaux Γ	179
4.3.3. Discrimination selon la composition intracellulaire	180
4.3.4. Couplage avec le bioréacteur	181
4.3.4.1. Modèle de bioréacteurs idéaux	181
4.3.4.2. Modèle de bioréacteurs réels	185
Bibliographie	191
Index	201